

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Návrh a realizace kombinace logaritmicko periodické a Yagi-Uda  
antény (LPY)**

**Design and Realisation Combination LPA and Yagi-Uda  
Antenna (LPY)**

**2018**

**Petr Lanzendörfer**

## Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Lanzendörfer**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: **Návrh a realizace kombinace logaritmicko periodické a Yagi-Uda antény (LPY)**  
**Design and Realisation Combination LPA and Yagi-Uda Antenna (LPY)**

Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

LPY anténa je kombinací logaritmicko periodické antény a Yagi-Uda antény. Práce si klade za cíl popis, návrh a výrobu modelu antény na zadaném kmitočtu.

Vypracování práce bude splňovat následující body zadání:

1. Popište a porovnejte logaritmicko periodickou a Yagi-Uda anténu.
2. Proved'te simulace antény ve vhodném simulačním programu.
3. Realizujte praktický model antény na zadaném kmitočtu.
4. Proveďte správnost návrhu a konstrukce měřením. Výsledky měření vyhodno'te.

### Seznam doporučené odborné literatury:


BALANIS, Constantine. *Antenna Theory : Analysis and design*. 3rd edition. United States : Wiley, 2005. 1117 s. ISBN 0-471-66782-X.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Dvorský, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 30.04.2018

  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry




  
prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 26. dubna 2018

  
.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Marek Dvorský, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této práce.

## **Abstrakt**

Předmětem mé bakalářské práce je Logaritmicko periodická Yagi-Uda anténa. V první části jsou popsány základní vlastnosti a parametry antén. Následně se práce zabývá popisem Logaritmicko periodických a Yagi-Uda antén. Dále je popsána anténa LPY a rozdíly mezi výše uvedenými anténami. Další část této práce se zabývá návrhem a simulací LPY antény v programu 4NEC2. Předposlední část této práce se zabývá postupem praktické realizace antény. Nakonec je správnost návrhu ověřena měřením vybraných parametrů zkonstruované antény.

## **Klíčová slova**

Anténa, LPY, Yagi-Uda, Logaritmicko periodická.

## **Abstract**

The subject of this Bachelor thesis is Log periodic Yagi-Uda antenna. The first part of my Bachelor thesis describes the basic characteristics and parameters of antennas. Then the work addresses description of Log periodic and Yagi-Uda antennas. Furthermore the work describes LPY antenna and differences between antennas mentioned above. Next part of this work deals with design and simulation of LPY in 4NEC2 programme. Penultimate part of this work addresses practical realization of the antenna. Finally last part describes the correctness of design, verified by measuring selected parameters of constructed antenna.

## **Key words**

Antenna, LPY, Yagi-Uda, Log periodic.

# Obsah

1	Anténa .....	- 16 -
1.1	Způsob použití.....	- 16 -
1.2	Konstrukce .....	- 16 -
1.3	Základní parametry antén.....	- 16 -
1.3.1	Vstupní impedance .....	- 17 -
1.3.2	Poměr stojatých vln .....	- 17 -
1.3.3	Směrové vlastnosti antény .....	- 18 -
1.3.4	Předozadní poměr .....	- 19 -
1.3.5	Zisk antény .....	- 20 -
1.3.6	Účinnost antény .....	- 20 -
1.3.7	Polarizační vlastnosti.....	- 20 -
1.3.8	Šířka pásma .....	- 20 -
1.4	Napájení antén.....	- 21 -
1.4.1	Symetrizační obvody .....	- 22 -
2	Popis antén Yagi-Uda, LPDA a LPY .....	- 23 -
2.1.1	Základní popis .....	- 23 -
2.1.2	Historie a použití .....	- 23 -
2.1.3	Symetricky napájený dipól.....	- 24 -
2.1.4	Skládaný dipól.....	- 24 -
2.1.5	Direktor .....	- 25 -
2.1.6	Reflektor.....	- 25 -
2.1.7	Zisk Yagi-Uda .....	- 25 -
2.1.8	Soustavy antén Yagi-Uda.....	- 26 -
2.1.9	Konstrukce antén Yagi-Uda a jejich materiály.....	- 27 -
2.2	Logaritmicko periodické antény .....	- 28 -
2.3	Logaritmicko periodická Yagi-Uda anténa .....	- 30 -
2.3.1	Porovnání vlastností a konstrukce antén LPY a LPDA a Yagi-Uda .....	- 31 -
2.3.2	Přehled základních parametrů a vzorců pro výpočet antény LPY .....	- 32 -
3	Výpočet a simulace Logaritmicko periodické Yagi-Uda antény .....	- 35 -
3.1.1	Výpočet LPDA části.....	- 35 -
3.1.2	Výpočet Yagi-Uda části .....	- 36 -

3.2	Simulace v programu .....	- 37 -
3.3	Optimalizace Antény.....	- 42 -
4	Konstrukce a ověření správnosti návrhu antény.....	- 46 -
4.1	Konstrukce – realizace antény .....	- 46 -
4.1.1	Postup realizace:.....	- 47 -
4.2	Měření antény .....	- 50 -
4.3	Zhodnocení.....	- 53 -
5	Závěr .....	- 55 -
	Použitá literatura .....	- 56 -
	Přílohy .....	- 58 -



## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
<b>B</b>	Hz	Šířka pásma
<b>c</b>	m/s	Rychlost světla ve vakuu
<b>d</b>	mm	Průměr vodiče
<b>F/B</b>	dB	Předozadní poměr
<b>f</b>	Hz	Frekvence
<b>G</b>	dB	Zisk antény
<b>I</b>	A	Proud
<b>k</b>	-	Zkracovací činitel
<b>l</b>	m	Délka prvků antény
<b>P</b>	W	Výkon
<b>R</b>	$\Omega$	Odpor
<b>U</b>	V	Napětí
<b>X</b>	$\Omega$	Reaktance
<b><math>\alpha</math></b>	-	Polovina vrcholového úhlu
<b><math>\tau</math></b>	-	Koeficient geometrické řady
<b><math>\sigma</math></b>	-	Konstanta relativní vzdálenosti mezi prvky
<b><math>\lambda</math></b>	m	Vlnová délka
<b><math>\eta</math></b>	%	Účinnost antény

## Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
<b>LPY</b>	Logaritmicko periodická Yagi-Uda
<b>LPDA</b>	Logaritmicko periodická dipólová anténa
<b>LPA</b>	Logaritmicko periodická anténa
<b>PSV</b>	Poměr stojatých vln

## Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
1.1	Náhradní obvod vysílací antény	17
1.2	Jednoduché schéma vyzařovacího diagramu směrové antény	19
1.3	Určení šířky pásma pomocí poklesu o -3 dBi	21
1.4	Symetrizace půlvlnnou smyčkou	22
2.1	Pětiprvková anténa Yagi-Uda	23
2.2	Pětiprvková Yagi-Uda se symetrickým dipólem	24
2.3	Skládaný dipól	24
2.4	Graf znázorňující dosažený zisk Yagi-Uda antény v závislosti na počtu prvků	26
2.5	Příklad soustavy antény Yagi-Uda	27
2.6	Základní schéma LPDA	28
2.7	Praktická realizace LPDA antény	29
2.8	Šesti prvková Logaritmicko periodická Yagi-uda	30
2.9	Jednoduché schéma LPY antény	32
2.10	Schéma struktury LPDA	33
3.1	Vytvořené proměnné	37
3.2	Geometrie antény	38
3.3	Napájení antény	38
3.4	Nastavení frekvence a prostředí antény	38
3.5	Vyzařovací diagram	39
3.6	Graf znázorňující zisk antény ve vztahu k frekvenci	39
3.7	Vyzařovací diagram 3D sedmi prvkové antény LPY	40
3.8	Reálná a imaginární složka impedance v pásmu 135 až 160 MHz	40
3.9	Poměr stojatých vln antény	41
3.10	Činitel odrazu	41
3.11	4NEC2 optimizer	42
3.12	Vyzařovací charakteristika v 3D po optimalizaci	43

<b>3.13</b>	Vstupní impedance antény po optimalizaci	43
<b>3.14</b>	Poměr stojatých vln antény po optimalizaci	44
<b>3.15</b>	Činitel odrazu po optimalizaci	44
<b>3.16</b>	Celkový zisk po optimalizaci	45
<b>4.1</b>	Jednoduchý přehled radioamatérského pásma	46
<b>4.2</b>	Rozměry dle optimalizace v programu 4NEC2	48
<b>4.3</b>	Schéma zapojení instalační krabičky	48
<b>4.4</b>	Praktické provedení uchycení LPDA prvků, jeho zapojení, včetně symetrizační smyčky a propojení prvků pomocí uzemňovacího kabelu	49
<b>4.5</b>	Vzhled vyrobené LPY antény	49
<b>4.6</b>	Vzhled vyrobené LPY antény	50
<b>4.7</b>	Anténní analyzátor MFJ 259B	50
<b>4.8</b>	Graf naměřených hodnot SWR	52
<b>4.9</b>	Graf naměřených hodnot v rozmezí 100 až 200 MHz	52

---

## Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo tabulky	Název ilustrace	Číslo stránky
2.1	Přibližné hodnoty zisku Yagi-uda antény	26
3.1	Základní parametry antény LPY	37
3.2	Rozměry LPY antény před a po optimalizaci	42
4.1	Změřené hodnoty pomocí anténního analyzátoru MFJ 259B	51

---

## Úvod

Tato práce popisuje Logaritmicko periodickou Yagi-Uda anténu (LPY). Tento typ antény jsem si vybral, protože je méně známa a málo popsána. O anténě LPY se zmiňuje Matuszczyk [1] ve své knize. V přípravě na bakalářskou práci bylo nutné najít ještě další odpovídající zdroje. Při hledání se mi potvrdilo, že anténa LPY je minimálně využívána, až na některé výjimky radioamatérů v zahraničí. Nezbyvalo nic jiného, než kontaktovat přímo pana Matuszczyka. Ten mne ve své e-mailové odpovědi odkázal na anglický zdroj ARRL[2]. Tento konkrétní časopis se mi podařilo nalézt a z něho jsem ve své práci čerpal.

Aby bylo možno zcela dokonale popsat anténu LPY, bylo nutné v bakalářské práci podrobněji popsat antény LPDA a Yagi-Uda. Důvodem je to, že samotná anténa LPY je zkříženou formou antén LPDA a Yagi-Uda. V podkapitolách 3.1.1 a 3.1.2 jsou rozepsány výpočty rozměrů antény LPY, dále pak v podkapitole 3.2 je rozebrána simulace antény v modelovacím programu 4NEC2. V rámci bakalářské práce bude provedeno zkonstruování antény a změření jejích skutečných parametrů. Naměřené hodnoty budou porovnány s teoretickými výpočty. V závěru bude zhodnocena anténa LPY a provedeno doporučení na další zlepšení vlastností.

Civilizace 21. století má silnou potřebu přenosu dat, informací a zvukových a obrazových přenosů. Obrovský význam má přenos dat pomocí vodičů, či optických vláken. Tato okolnost, ale nesnižuje význam bezdrátového přenosu. Přenos informací pomocí radiových signálů je jednou z možností. Zákonitě se zvyšují nároky na kvalitu přenosu a optimalizaci konstrukcí anténních systémů. Současný radiový provoz začíná být přetížený a kladou se zvýšené nároky na správné fungování antén, aby nedocházelo k překrývání a rušení v pásmech, které patří k jinému užití.

# 1 Anténa

Anténa je zařízení, jež přeměňuje elektrický signál na elektromagnetické vlny a naopak. Anténa plní funkci koncového a vstupního elementu radiokomunikačního řetězce, proto podstatnou měrou určuje celkový výsledek. Pokud vysílač, nebo přijímač vyzáří, či obdrží od antény elektrický signál nevalné hodnoty, tak logicky vyplývá, že očekávaný výsledek nebude splňovat požadované hodnoty. Bezdrátový přenos signálu volným prostorem zajišťují rádiové vlny. Rádiové vlny jsou jen určitou částí spektra z celé šíře elektromagnetického záření. Antény se využívají téměř ve všech částech každodenního života, a to například v komerčním rozhlasovém přijímači, telefonech, televizním přijímači, Wi-Fi, nebo v různých druzích dálkových ovladačů. Avšak různé typy antén mají rovněž speciální i vědecké využití. Za příklad může sloužit radioastronomie, sledování vesmírných objektů v oblasti rádiových vln.[1][3][4][5]

Antény můžeme dělit podle mnoha různých hledisek. Mezi ty základní patří způsob použití, konstrukce nebo směr vysílání.

## 1.1 Způsob použití

- stacionární antény: jsou trvale nainstalované. Patří mezi ně například velké televizní vysílače.
- mobilní antény: jsou to například antény na mobilních prostředcích jako auta, lodě letadla.
- přenosné antény: se používají pro přenosné radiostanice (za předpokladu snadné montáže a demontáže)

## 1.2 Konstrukce

- drátové antény: se používají pro vysílání především na dlouhých vlnách. Své využití ale najdou i v pásmu středních a krátkých vln. Používají se v oblastech, kde je zapotřebí velkého pokrytí, například v radionavigaci, rozhlasových službách nebo také k přenosu časového signálu.
- trubkové, tyčové antény: jsou to samonosné antény. Patří mezi ně dipóly, quad, Yagi-Uda a další.
- reflektorové antény: (parabolická, ofsetová, rovinná, rohová) tyto antény se především používají pro příjem ze satelitního vysílání nebo v oboru radioastronomie a radiolokace.

V technické praxi se využívá celá řada různých druhů antén. Jejich třídění bychom mohli provést podle různých měřítek, např. podle typů, konstrukce, nebo metod návrhu: anténa smyčková, magnetická, spirálovitá, šroubovicová, štěrbínová, trychtýřová, sinusová, s unikající vlnou, s povrchovou vlnou, teleskopická, pružinová, diskonová.[3]

## 1.3 Základní parametry antén

Pro popis základních charakteristik používáme několik parametrů. Mezi ty nejdůležitější patří zisk antény, směrovost a vstupní impedance. Existuje i řada dalších parametrů pro popis antény. Níže jsou některé důležité parametry antén.

### 1.3.1 Vstupní impedance

Vstupní impedance se skládá ze dvou složek, z reálné a imaginární, jde tedy o komplexní veličinu, a uvádí se jako poměr napětí a proudu na vstupních svorkách antény.[4]

$$Z_{in} = \frac{U_{in}}{I_{in}} = R_{in} + jX_{in}[\Omega] \quad (1.1)$$

$$R_{in} = R_{loss} + R_{rad}[\Omega] \quad (1.2)$$

kde

$Z_{in}$  je vstupní impedance antény [ $\Omega$ ]

$U_{in}$  je napětí na vstupních svorkách antény [V]

$I_{in}$  je proud na vstupních svorkách antény [A]

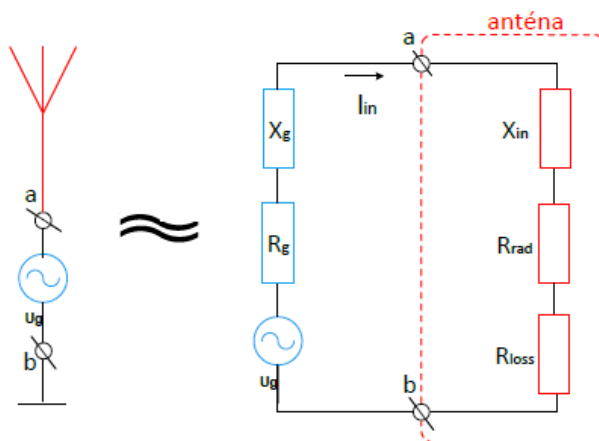
$R_{in}$  je vstupní činný odpor [ $\Omega$ ]

$X_{in}$  je vstupní reaktance antény [ $\Omega$ ]

$R_{loss}$  je ztrátový odpor [ $\Omega$ ]

$R_{rad}$  je vyzařovací odpor antény [ $\Omega$ ]

Imaginární složka může mít buď induktivní (kladný) nebo kapacitní (záporný) charakter. Vstupní odpor je poté součet vyzařovacího odporu a odporu ztrátového, který se mění v teplo. Pro správné fungování antény je potřeba, aby impedance antény byla co nejbližší impedanci přírodního vedení (napájení). Pokud je nutné anténu přizpůsobit, používá se zkracovací smyčka nebo různé jiné přizpůsobovací obvody jako L, T nebo gamma články.



Obrázek 1.1: Náhradní obvod vysílací antény[6]

### 1.3.2 Poměr stojatých vln

Poměr stojatých vln je v angličtině známý jako standing wave ratio, tedy SWR. PSV může nabývat hodnot 1 až nekonečno a vyjadřuje poměr výkonu směřujícího od zdroje k zátěži proti výkonu odraženého od nepřizpůsobení mezi vedením a zátěží. Pokud má PSV hodnotu 1, dochází k maximálně možnému přenosu energie na anténu. Pro poměr stojatých vln napětí se používá VSWR.



$$PSV = \frac{U_{max}}{U_{min}} = \frac{U_f + U_r}{U_f - U_r} [-] \quad (1.3)$$

kde

$U_{max}$  je maximum stojaté vlny na vedení [V]

$U_{min}$  je minimum stojaté vlny na vedení [V]

$U_f$  je amplituda dopředné vlny [V]

$U_r$  je amplituda odražené vlny [V]

Poměr stojatých vln může být definován z činitele odrazu [ $\rho$ ]:

$$PSV = \frac{1+\rho}{1-\rho} [-] \quad (1.4)$$

kde

$\rho$  je činitel odrazu [-]

$\delta$  je PSV

Činitel odrazu je definován jako poměr odražené vlny ku postupné, jak je vidět ze vztahu:

$$\rho = \frac{U_{odr}}{U_{pos}} [-] \quad (1.5)$$

kde

$U_{odr}$  je odražená vlna [V]

$U_{pos}$  je postupující [V]

Mezi PSV [ $\delta$ ] a činitelem odrazu  $\rho$  platí vztah:

$$\rho = \frac{\delta-1}{\delta+1} [-] \quad (1.6)$$

Z výše uvedených vztahů vyplývá, že další možnost jak vyjádřit odraženou vlnu od nepřizpůsobení je pomocí činitele odrazu  $S_{11}$  [ $\rho$ ]. Tento činitel vyjadřuje zisk odraženého signálu v dB a podobně jako PSV popisuje, jak dobře je anténa přizpůsobená. Nabývá hodnoty 0 až 1. V případě ideálního přizpůsobení by byla jeho hodnota nulová. [4]

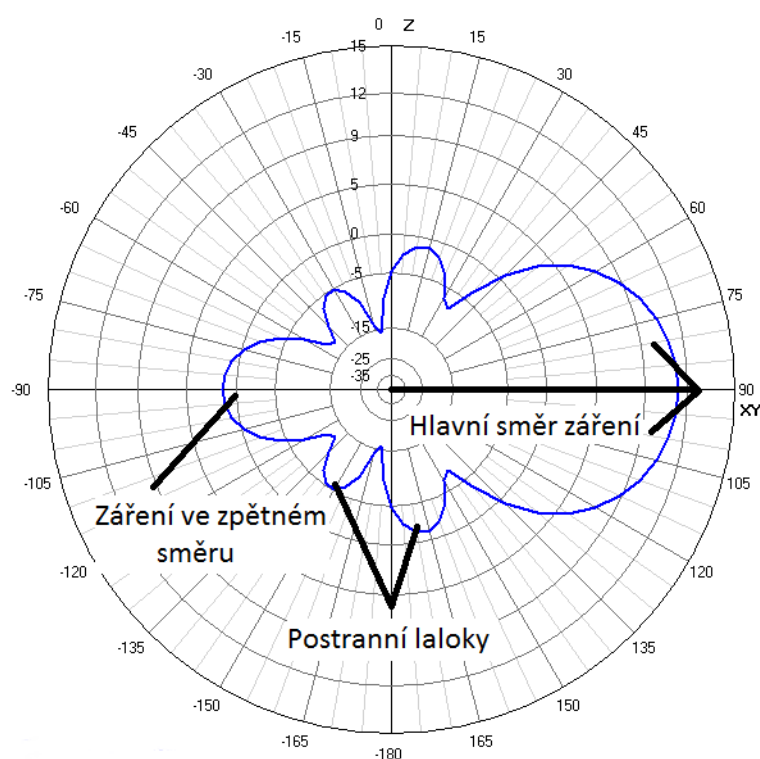
### 1.3.3 Směrové vlastnosti antény

Směrovost antény je její schopnost vyzařovat nebo přijímat signál v požadovaném směru. Lze ji vyjádřit pomocí 3D vyzařovací charakteristiky, nebo pomocí 2D charakteristik v elektrické a magnetické rovině. Vyzařovací charakteristiky můžeme rozdělit na vertikální a horizontální. Z hlediska směrovosti rozdělujeme antény na „všesměrové a směrové“.

Všesměrové antény přijímají a vysílají signály ze všech směrů. V praxi je tím myšleno vysílání nebo přijímání signálu ze všech stran v horizontální rovině. Směrem k zemi nebo k nebi vykazují tyto antény menší zisk. Izotropická anténa, tedy anténa se stejným ziskem v horizontální i vertikální rovině, v praxi neexistuje, jedná se o teoretický pojem. Tyto antény jsou nejčastěji využívány v případě, kdy neznáme přesnou polohu vysílače nebo přijímače. Nevýhodou všesměrové

antény proti směrové anténě je, že nemůže dosáhnout takového zisku jako anténa směrová v jejím směru vyzařování. Jako příklad všesměrových antén můžeme uvést např. "whip" anténu, "RubberDucky" anténu, vertikálně orientovaný dipól, horizontální "loop" anténu, nebo např. "discone" anténu.

Směrové antény vykazují mnohem větší zisk v určitých směrech. Tím umožňují menší rušení ze stran, z nichž signál nepřijímáme. V praxi jsou směrové antény vhodné především uvnitř budov a v případech, kdy přesně víme, kde je cílená stanice. Nejtypičtějším příkladem směrové antény je parabolická anténa, jež se hlavně používá pro příjem satelitní televize. Mezi další směrové antény můžeme zařadit např. Yagi-Uda nebo Logaritmicko periodickou dipólovou anténu. V případě, že je nutné přijímat signály z různých radiových stanic z různých směrů je nutné pro zvýšení zisku nasměrovat anténu do požadovaného směru. K tomuto se používá natáčecí mechanismus propojení s elektronickou jednotkou s rozpoznáním azimutu. [3]



Obrázek 1.2: Jednoduché schéma vyzařovacího diagramu směrové antény

#### 1.3.4 Předozadní poměr

Předozadní poměr udává poměr napětí získaného v požadovaném směru oproti napětí získaného v opačném směru. U antén zpravidla požadujeme, aby byl tento poměr co největší.[7]

$$F/B = 20 \log \frac{U_{\max}}{U_{180}} [dB] \quad (1.6)$$

kde  $U_{\max}$  je napětí v požadovaném směru

$U_{180}$  je napětí v opačném směru

### 1.3.5 Zisk antény

Zisk antény  $G$ , je relativní hodnota, vyjadřující vztah mezi naší anténou a anténou referenční. Zisk je dán logaritmem poměru napětí ( $U_1/U_2$ ) nebo výkonu ( $P_1/P_2$ ) na zátěži, kde

$U_1$  je napětí na zátěži měřené antény [V]

$U_2$  je napětí na zátěži referenční antény [V]

$P_1$  je výkon na zátěži měřené antény [W]

$P_2$  je výkon na zátěži referenční antény [W]

$$G = 20 \log \frac{U_1}{U_2} = 10 \log \frac{P_1}{P_2} [\text{dBi, dBd}] \quad (1.7)$$

Jinak řečeno zisk udává, kolikrát vyšší vyzářený výkon bude na měřené anténě oproti referenční při stejném vstupním napětí. Používaná jednotka je decibel [dB]. Jednotka dBi vyjadřuje zisk antény ve srovnání s izotropickou, kdežto dBd vyjadřuje zisk ve srovnání s půlvlnným dipólem. Nejčastěji se setkáme se značením dBi nebo dBd. Půlvlnný dipól má zisk 2,15. Pro převod mezi dBd a dBi tedy platí

$$\text{dBi} = \text{dBd} + 2,15 \quad (1.8)$$

### 1.3.6 Účinnost antény

Je to celková účinnost antény  $\eta$ , která obsahuje i ztráty na vstupu z impedančního nepřizpůsobení a ztráty vznikající konečnou vodivostí kovů a ztráty v dielektriku.[6]

$$\eta = \frac{R_{\Sigma \text{vst}}}{R_{\Sigma \text{vst}} + R_{\text{ztr}}} \cdot 100 [\%] \quad (1.9)$$

kde

$R_{\Sigma \text{vst}}$  je odpor záření vztažený ke vstupnímu proudu [ $\Omega$ ]

$R_{\text{ztr}}$  je ztrátový odpor antény, vztažený ke vstupnímu proudu [ $\Omega$ ]

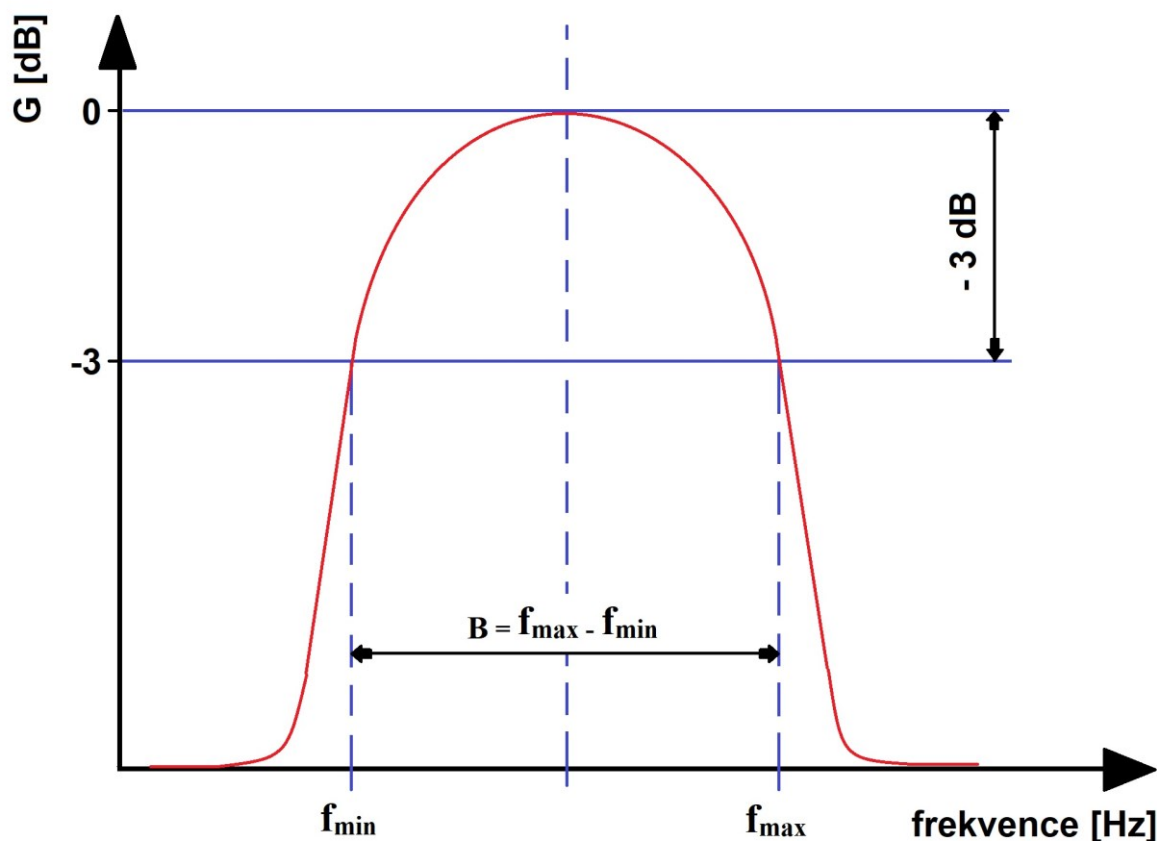
### 1.3.7 Polarizační vlastnosti

Polarizační vlastnosti antény můžeme chápat jako samotnou polarizaci elektromagnetické vlny vyzařované anténou vzhledem k pozici země. Pokud by prostorová orientace přijímací antény byla jiná než přijímaná vlna, může dojít k útlumu signálu až o 20 dB. Nejčastěji používané pro pozemní vysílání jsou lineární vertikální a lineární horizontální polarizace

V pozemním vysílání se používá horizontální a vertikální polarizace. V satelitním vysílání se používá eliptická nebo kruhová polarizace.[6]

### 1.3.8 Šířka pásma

Šířka pásma (označujeme  $B$ ) je rozsah frekvencí, při kterých se anténa stále chová standardním způsobem. Šířku pásma můžeme zjistit poklesem o -3 dB oproti nejvyšší hodnotě.



Obrázek 1.3: Určení šířky pásma pomocí poklesu o - 3 dB

## 1.4 Napájení antén

Přenos signálu ze svorek antény na koncový stupeň (vstup přijímače) je zajištěn vysokofrekvenčním vedením zvaným napáječ. Obvykle součástí napájecí sítě bývají symetrizační a přizpůsobovací prvky, jenž mají za úkol přizpůsobit impedanci napáječe k vlastní anténě. Symetrické antény vyžadují symetrické napájení. Pokud chceme připojit nesymetrické napájení k symetrické anténě, musíme použít symetrizační prvek. Konečné hodnoty antény, především zisk, mohou ovlivnit vlastnosti napáječe. Proto by měly napáječe přenášet energii elektromagnetického pole s co nejmenšími ztrátami. Rovněž vodivé předměty v blízkosti symetrického vedení způsobují nežádoucí narušení. Napáječe by neměly vyzařovat a měly by být zároveň odolné proti vysokofrekvenčnímu rušení. Hojně využívaným napájecím vedením je koaxiální kabel, což je nesymetrické vedení. Mezi symetrické vedení můžeme například zařadit dvou vodičové vedení. Mezi velké nedostatky dvou vodičových vedení patří ztráty způsobené ohybem. Symetrické vedení je v současné době využíváno hlavně jen radioamatéry.

Základním parametrem každého napáječe je jeho charakteristická impedance. Výpočet charakteristické impedance koaxiálního kabelu můžeme provést podle vzorce:

$$Z_{ov} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{a_2}{a_1} \quad (1.10)$$

kde

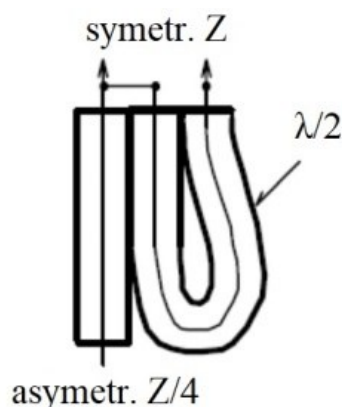
$a_2$  a  $a_1$  jsou poloměry vnějšího a vnitřního vodiče.

$\epsilon_r$  je relativní permitivita

S rostoucím kmitočtem roste útlum napáječe. Jeho hodnotu ovlivňuje kvalita materiálů, která může zapříčinit ztráty. Například nevhodné použití dielektrika a nízké vodivosti vodičů.

#### 1.4.1 Symetrizační obvody

Přestože většina antén používaných v pásmu VKV jsou antény symetrické, v praxi se používá nesymetrické napájení - koaxiální vedení. K propojení nesymetrického napáječe se symetrickými vstupy antén se vyžaduje vložení symetrizačních členů, tímto způsobem se zajistí správná činnost antény. Přímé připojení nesymetrického vedení k symetrické anténě svede ke ztrátám výkonu vlivem nepřizpůsobení. Navíc by došlo k fázové chybě, která deformuje vyzařovací diagram antény. Symetrizačními obvody jsou také baluny – anglická zkratka pro „balanced to unbalanced convertor“.



Obrázek 1.4: Symetrizace půlvlnnou smyčkou[8]

Symetrizace půlvlnnou smyčkou znázorňuje obrázek obr. 1.4. Tento obvod je řešen tak, že obě ramena symetrické zátěže jsou připojena na střední vodič napájecího kabelu a vzniklá půlvlnná smyčka, jež působí jako fázový invertor. Z logiky věci i z obrázku vyplývá, že proudy svorkami zátěže jsou tedy protisměrné, což je žádoucí stav.

Tento způsob připojení obou "polovin" zátěže způsobí, že obvod mimo symetrizaci napáječe také transformuje impedanci. Budeme-li uvažovat impedanci zátěže „Z“ sériovým spojením impedancí „Z/2“ obou ramen, ke koaxiálnímu vedení budou obě ramena připojena paralelně, tudíž napájecí kabel bude zatěžován impedancí pouze Z/4.

## 2 Popis antén Yagi-Uda, LPDA a LPY

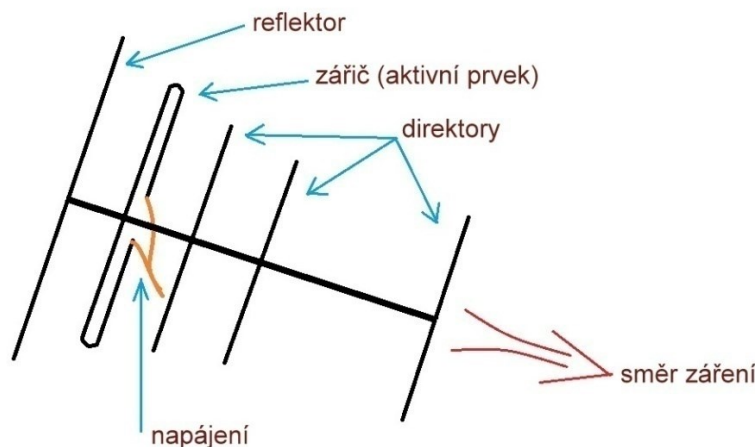
Jelikož je anténa LPY složena z antény Yagi-Uda, zabývá se tato kapitola jejím detailním popisem. Anténa Yagi, přesnější název anténa Yagi-Uda. Název vznikl spojením jmen tvůrců této antény. Japonští vědci Shintaro Uda a Hidetsugu Yagi vynalezli tuto anténu v roce 1926. Přestože měl pan Yagi menší podíl na objevení této antény, obvykle se tato anténa uvádí pouze jeho jménem.

### 2.1.1 Základní popis

„Yagiho anténa se skládá z jednoho aktivního prvku a několika prvků pasivních. Aktivním prvkem je symetrický dipól (nebo dipól skládaný), který většinou pracuje ve čtvrtvlnné rezonanci. Pasivní prvky jsou tvořeny dipóly bez napájecí štěrbiny. Jeden pasivní prvek, jehož délka je větší než délka aktivního prvku a jenž je umístěn vzadu, hraje roli reflektoru. Ostatní pasivní prvky, které jsou kratší než aktivní prvek a které jsou umístěny vpředu, jsou tzv. direktory“ [4]. Všechny elementy (aktivní a pasivní prvky, nebo také parazitní prvky) antény jsou umístěny ve stejné rovině a jsou zpravidla upevněné na ráhnu (používá se čtvercový profil tzv. jákl). Anténa Yagi-Uda je úzkopásmová a řadí se mezi směrové antény. Ve směru osy prvků zvané direktory, má největší zisk přijímaného signálu a zároveň v tomto směru největší intenzitu vyzáření elektromagnetického záření. Instalovat je možno anténu v horizontální, ale i ve vertikální poloze. K aktivní části antény zvané dipól je připojen koaxiální kabel, který zajišťuje propojení s přijímacím a vysílacím zařízením. [1][3][4][7][9][10][11]

### 2.1.2 Historie a použití

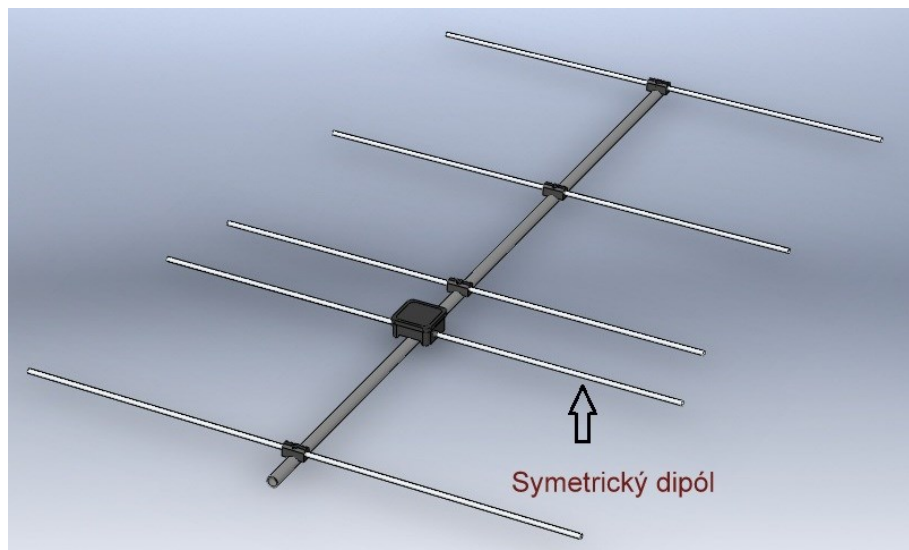
Yagi-Uda anténa se ve větším měřítku začala využívat během druhé světové války. Jednoduchá konstrukce Yagi-Uda antény vedla k velkému rozmachu až po druhé světové válce. Svou oblibu získala především u radioamatérů, kteří Yagiho anténu používají pro komunikaci v pásmu krátkých vln, velmi krátkých vln, ultra krátkých vln až po mikrovlnná kmitočtová pásma. Radioamatéři rádi konstruují tento typ antény a tím přispěli k obohacení teoretických a praktických znalostí této antény. Závěry jejich bádání se objevují v odborných časopisech. Radioamatéři jsou autoři mnohých zdařilých návrhů a jsou tvůrci počítačových programů. Úspěch Yagi-Uda antény byl završen, když našla své využití jako televizní anténa. [11][12]



Obrázek 2.1: Pětivrvková Yagi-Uda [3]

### 2.1.3 Symetrický napájený dipól

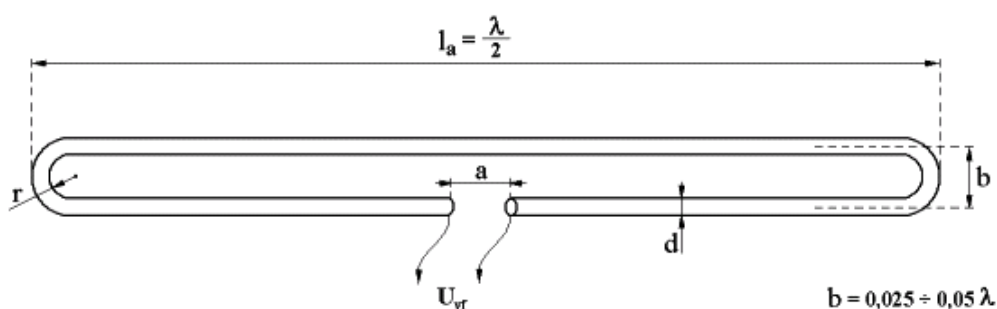
Aktivním prvkem Yagi-Uda antény může být symetrický dipól. Symetrický dipól, nazývaný také jednoduchý dipól, nebo otevřený dipól, je aktivní prvek, který je složen ze dvou stejně dlouhých přímých ramen ležících na společné ose. Ramena jsou od sebe oddělena úzkou štěrbinou, do níž připojujeme symetrický napěťový zdroj.



Obrázek 2.2: Pětiprvková Yagi-Uda se symetrickým dipólem[13]

### 2.1.4 Skládáný dipól

Další variantou zářiče Yagi-Uda je skládaný dipól. Tento dipól je základ pro převážnou většinu antén. Dipólovou anténu vynalezl německý fyzik Heinrich Hertz kolem roku 1886. Skládáný dipól má ve volném prostoru impedanci  $300 \Omega$ . Dipól je symetrický a vyžaduje symetrické napájení. Napájení pomocí nesymetrického koaxiálního kabelu je nutné přizpůsobit. V praxi se používá tzv. přizpůsobovací smyčka.



Obrázek 2.3: Skládáný dipól[13]

kde

- $l_a$  je celková délka
- $a$  je velikost štěrbiny
- $d$  je průměr
- $r$  je poloměr zakřivení
- $b$  je rozteč
- $U_{vr}$  napájení antény

### 2.1.5 Direktor

Direktory umožňují vznik povrchové vlny podél antény. Proto antény Yagi-Uda patří do skupiny s povrchovou vlnou. Direktory zajišťují zvětšení prostorové oblasti, ze které je možno vysát energii elektromagnetické vlny. Se vzrůstem efektivní plochy antény Yagi-Uda zákonitě roste její zisk. Jednotlivé direktory jsou dipóly se zkratovými svorkami. „Vlna přijatá direktorem se od zkratu odráží a je zpět vyzářena s fázovým zpožděním daným délkou direktoru. Jsou-li vzájemné rozteče direktorů v souladu s fázovými posuvy, vznikne vedená vlna, která energii s přispěním reflektoru předá prostřednictvím zářiče do napáječe.“ [6] Volbou roztečí a délek direktorů se ovlivňují vlastnosti antén. Direktory se postupně zkracují ve směru od zářiče a jejich vzájemné rozteče se zvětšují. Tímto způsobem se potlačují postranní laloky příjmu a zvětšuje se šířka pásma. Délka direktorů je cca  $0,4 \div 0,45 \lambda$  a vzdálenosti mezi nimi je  $0,2 \div 0,4 \lambda$ . Rozměry, počet a vzájemné rozteče direktorů mají zásadní vliv na směrové vlastnosti antény. Prvkem s významným postavením je kompenzační direktor umístěný nejbližší zářiče. Tento prvek má největší vliv na impedanci.[6][15]

### 2.1.6 Reflektor

Jeden ze sledovaných parametrů antény Yagi-Uda je tzv. předozadní poměr, což zajišťuje reflektor. Činnost reflektoru do značné míry omezuje nežádoucí zadní vyzařování a současně zvyšuje intenzitu vyzáření ve směru direktorů. Úkolem reflektoru je zároveň eliminovat příjem radiových signálů ze zadního směru. Samotný reflektor může mít různou podobu. Může se skládat z více tyčovitých prvků, počet není omezen. Méně obvyklá konstrukce reflektoru je zástěna z rovného, nebo zahnutého plechu. U komerčně vyráběných televizních antén se ve velké míře objevily reflektory z drátové mřížky (tzv. síto). „Délka vodiče reflektoru a jeho vzdálenost od zářiče musí být takové, aby se v reflektoru indukovaly VF proudy v protifázi, takže odráží elektromagnetickou energii směrem k soustavě direktorů. Musí tedy být vzdálen od zářiče asi  $0,15 \lambda$  až  $0,25 \lambda$  a jeho rezonanční délka musí být  $l_r$  rovno, nebo menší  $0,5 \lambda$ “. [3] [6]

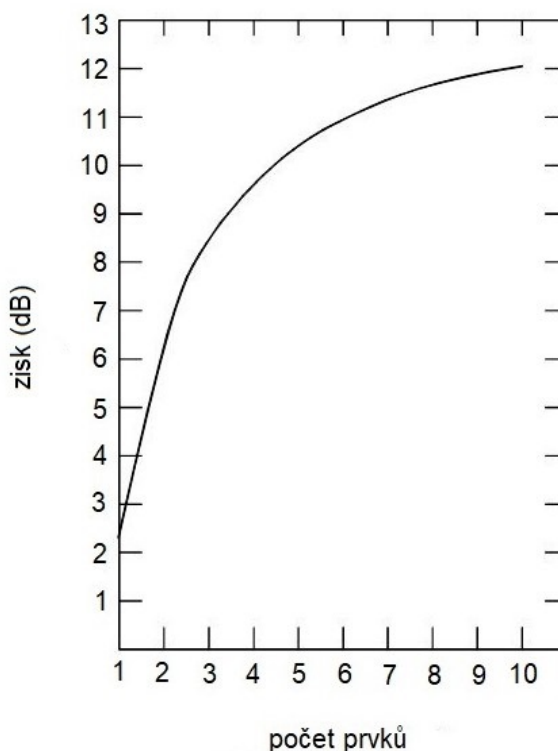
### 2.1.7 Zisk Yagi-Uda

Nejsledovanějším parametrem všech antén je zisk. Pro Yagi-Uda anténu platí, čím delší je anténa a čím více má prvků tím má větší zisk. Zvětšování zisku tímto způsobem má své omezení (limitem jsou neúnosně dlouhé antény). Navíc přidáváním dalších a dalších prvků sebou přináší menší a menší zisk. Z tohoto hlediska je schůdnější a levnější přikročit k realizaci anténních soustav. „Každým zdvojením soustavy se její zisk teoreticky zvyšuje o 3 dB. Pokud bychom chtěli dosáhnout téhož zvýšení zisku prodloužením jedné antény, museli bychom její délku zvětšit vícekrát, např. z délky  $2 \lambda$  na  $5 \lambda$  ! Další zvýšení zisku o 3dBi by si již vynutilo použití antény dlouhé  $12 \lambda$ , což činí v pásmu 145 MHz již 24 m“. [1][7][10]



Tabulka 2.1: *Přibližné hodnoty zisku Yagi-Uda antény*

Počet prvků	Očekávaný zisk [dBi]
2	5
3	7,5
4	8,5
5	9,5
6	10,5
7	11,5



Obrázek 2.4: *Graf znázorňující dosažený zisk Yagi-Uda antény v závislosti na počtu prvků[3]*

### 2.1.8 Soustavy antén Yagi-Uda

Z důvodu většího zisku v praxi dochází ke spojování Yagi-Uda antén. Podmínkou je, aby antény byly z hlediska konstrukce a vlastností stejné. Soustavy antén jsou párové, počty antén mají být 2, 4, 8, 16 s teoretickým ziskem zvětšeným postupně o 3, 6, 9, 12 dBi (Ve skutečnosti je přírůstek zisku poněkud menší než 3 dBi, a v praxi musíme počítat s reálnou hodnotou 2,5 až 2,8 dBi.). Teoreticky počet antén v soustavě je neomezený, je odvislý od technického omezení celé soustavy a finanční náročnosti. Antény se umísťují nad sebou, nebo vedle sebe. Velmi důležité

je propočítat správnou vzdálenost mezi jednotlivými anténami, aby se v důsledku překrytí vyzařovacího prostoru vzájemně negativně neovlivňovaly. „Výsledný tvar směrového diagramu soustavy, resp. nejvhodnější vzdálenost pro dosažení maximálního zisku, lze stanovit výpočtem, známe-li směrový diagram dílčí antény v rovině, v níž chceme dílčí antény řadit“.[16]



Obrázek 2.5: Příklad soustavy antény Yagi-Uda[17]

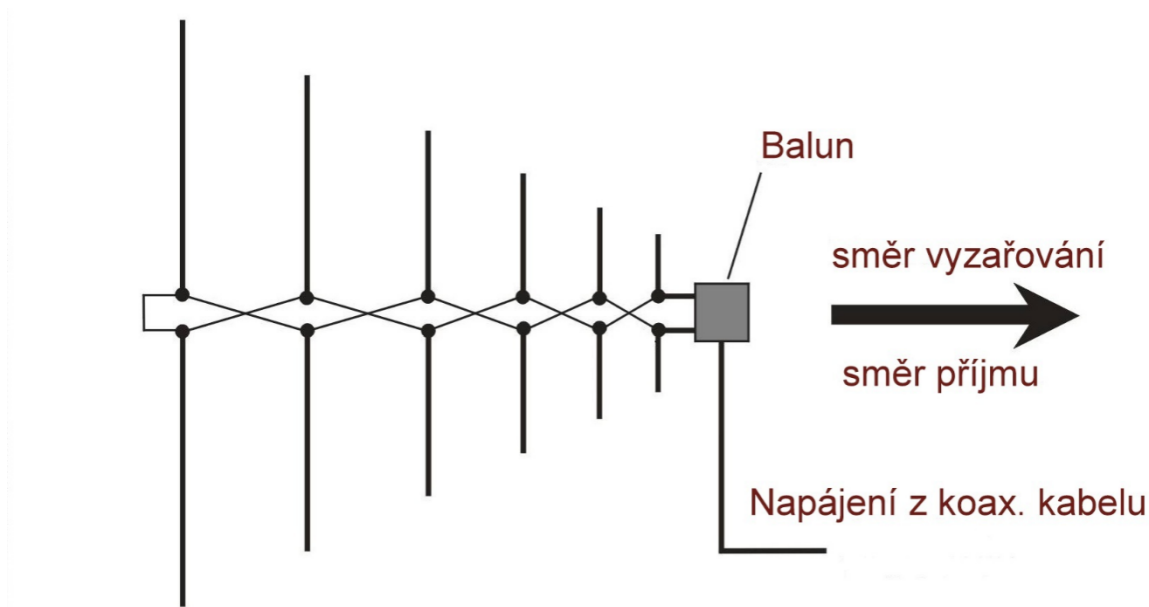
#### 2.1.9 Konstrukce antén Yagi-Uda a jejich materiály

Zohlednění odolnost proti větru (km/h) je považováno za nutnost. Proto se pro výrobu samotných antén doporučuje používat materiály z lehkých kovových slitin odolné na mechanické namáhání. Ideálním materiálem je Dural. Ověřenou slitinou je hliník (převažující složka) a mangan. Úchytné části antén se nejčastěji zhotovují z oceli. Z důvodu rychlé koroze se doporučuje, aby ocelové díly byly pozinkovány. Výhodou je použít spojovací díly (šrouby, matice atd.) z nerezové oceli. Anténa a její úchytné součásti musí odolat dalším extrémním klimatickým výkyvům. Nesmí se používat materiály, které vlivem mrazu křehnou a hrozí ulomení, či vyštípnání materiálu. Mezi takové materiály patří některé slitiny mosazi.[17]

## 2.2 Logaritmicko periodické antény

Jakožto součástí soustavy LPY je v této kapitole detailně popsána Logaritmicko periodická anténa. Ta byla vynalezena v roce 1958 na univerzitě v Illinois Dwightem Isbellem a Raymondem DuHamelem. K masivnímu využití tohoto typu antény došlo teprve nedávno. Typickým ukazatelem Logaritmicko periodických antén je, že velikost jejich parametrů se periodicky opakuje v logaritmické závislosti na kmitočtu. Toto kolísání je však tak malé, že v širokém pásmu jej můžeme zanedbat. Mezi její základní vlastnosti patří směrovost a extrémní širokopásmovost.

Nejčastější konstrukce logaritmicko periodické antény se skládá ze soustav dipólů. V češtině se používá (logaritmicko periodická dipólová řada), z toho je odvozena jeho zkratka LPDA. Český název se uvádí jako Logaritmicko periodická dipólová anténa. Tato anténa se skládá z půlvlnných dipólů, které se zvětšují podle konstanty  $\tau$ . LPDA je napájena od nejmenšího prvku směrem k tomu největšímu. Mezi jednotlivými dvojicemi dipólů je napájení překřížené, to znamená, že fáze dvojic dipólů je posunutá o  $180^\circ$ .

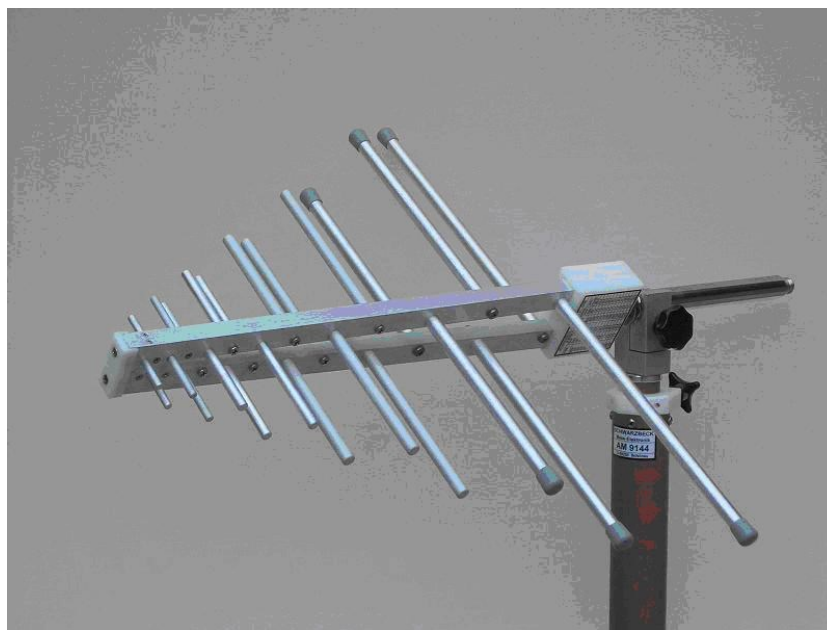


Obrázek 2.6: Základní schéma LPDA

LPDA je zdánlivě podobná anténě typu Yagi-Uda. Ve skutečnosti fungování těchto antén je zcela odlišné. Délka prvků a vzdálenosti mezi nimi se logaritmicky zvětšují od přední části antény po její konec. Přední částí je první prvek, na který je připojeno napájecí vedení z koaxiálního kabelu a zároveň je to poslední prvek ve směru vyzařování. U logaritmicko periodických antén v důsledku změny pracovního kmitočtu se mění aktivní oblast. V této oblasti antény se nacházejí prvky, které se blíží svou velikostí  $\lambda/2$ . Ostatní prvky se nezúčastňují na činnosti antény, neboť nesou malé proudy. Kratší prvky než  $\lambda/2$  představují kapacitní zátěž. Delší prvky než  $\lambda/2$  představují indukční zátěž. U antény LPA je možno měnit šířku pásma přidáním prvků. „Provozní pásmo LP antény je teoreticky neomezené. Prakticky je omezeno jen konstrukčními hledisky a provozními požadavky. Lze jej snadno měnit, rozšiřovat k nižším i vyšším kmitočtům přidáním dalších prvků za prvky koncové.“[10] Nevýhodou antén LPDA je, že ze vzrůstající frekvencí klesá jejich zisk. Tento nedostatek jde napravit

přidáním pasivních prvků Yagi-Uda antény (direktorů) k anténě LPDA, avšak tímto krokem vzniká nový typ antény – LPY. [4][7]

V praxi se anténa LPDA a antény LPA umísťují tam, kde je omezený prostor. Pro její malé rozměry a váhu se mohou montovat i do míst, kde by nebylo možné rozměrnější anténu upevnit, protože by hrozilo riziko nestability, a při extrémních povětrnostních podmínkách by mohli představovat bezpečnostní riziko.

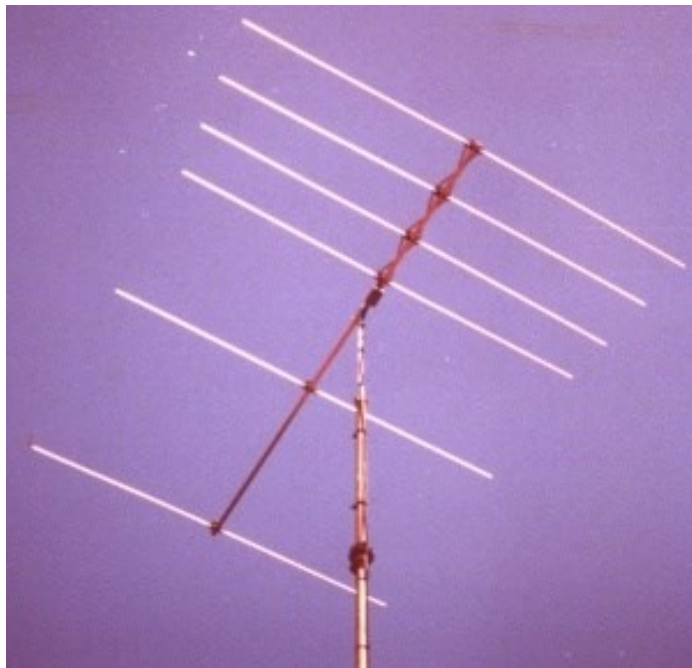


Obrázek 2.7: *Praktická realizace LPDA antény*[4]

Zvláštními případy Logaritmicke periodických antén je např. anténa logaritmická spirálová plochá, a. logaritmická spirálová kuželová, nebo a. logaritmická štěrbinová.[3]

### 2.3 Logaritmicko periodická Yagi-Uda anténa

Anténa Logaritmicko periodická Yagi-Uda (dále jen LPY) je kombinací dvou antén, a to logaritmicko periodické a Yagi-Uda. Je to směrová anténa a samotný název vznikl spojením názvů antén, z nichž se skládá. Kromě názvu Logaritmicko periodická Yagi-Uda anténa, je tento typ antény pojmenováván dalšími názvy: Log periodic Yagi, Log periodic Yagi array, Log-Cell Yagi. Anténa Swan je také kombinací antén LPDA a Yagi-Uda. Konstrukčně je téměř totožná s anténou LPY. Malý rozdíl najdeme v odlišném způsobu napájení prvků. [19]



Obrázek 2.8: Šesti prvková Logaritmicko periodická Yagi-Uda[20]

Antény Yagi-Uda na velmi dlouhých ráhnech nedokázaly odolat extrémním povětrnostním podmínkám. To vedlo radioamatéry, především na severu Evropy, aby hledali jiná řešení, která by zajistila stejný, nebo podobný zisk, ale na menších rozměrech ráhna. Hybridní anténa LPY se svými vlastnostmi přibližuje vlastnostem antén LPDA a Yagi-Uda. To však neznámá, že by anténa LPY přebírala všechny parametry zmíněných antén. Pakliže anténa Yagi-Uda je úzkopásmová a anténa LPDA extrémně širokopásmová, musí se zákonitě tyto hodnoty k sobě přiblížit, přitom rozhodujícím faktorem širokopásmovosti je LPDA struktura. U antény Yagi-Uda platí, že čím více má prvků, tím více je úzkopásmová. Takže snížení širokopásmovosti LPY oproti LPDA bude ovlivněno celkovým počtem přidaných prvků Yagi-Uda v rámci antény LPY. U antény Yagi-Uda spolu souvisí úzkopásmovost a zisk. [2] [20]

Yagi-Uda prvky (direktory) na společném ráhnu společně s aktivními prvky antény LPDA zvýší zisk celé antény, ale tento zisk bude vykoupěn zvětšením délky antény. Přitom anténa LPY bude rozhodně menší než anténa Yagi-Uda. Takže stále můžeme považovat délku antény LPY za nespornou výhodu. Stejně jako u antény Yagi-Uda tak také u LPY se s každým přidáním pasivního prvku o něco zvedne zisk. Zisk, který ovlivňují Yagi-Uda direktory v rámci antény LPY, není na různých frekvencích stejný. Mění se v závislosti s nastavenou pracovní frekvencí, ta totiž způsobuje přesun aktivní oblasti LPDA struktury. V důsledku změny aktivní části LPDA struktury se mění postavení

Yagi-Uda direktorů. Může se stát, že Yagi-Uda pasivní prvek se nenachází hned za prvkem nebo prvky, které vyzařují energii. Toto platí především u LPDA struktur, které mají více než 4 prvky. Tímto způsobem první pasivní prvek Yagi-Uda struktury v rámci LPY ztrácí svou výsadu prvního prvku. Jeho role se může změnit a stává se druhým či třetím prvkem. Prvky struktury LPDA, které se nezúčastňují na práci antény, přebírají částečně funkci direktorů. [1][19][22]

Musíme vzít v úvahu, že nárůst zisku v závislosti na počtu prvků Yagi-Uda struktury, neprobíhá lineárně. Činnost struktury Yagi-Uda prvků v rámci antény LPY, se řídí stejnými zákonitostmi tak, jak je to u antény Yagi-Uda. Každý další nový pasivní prvek přidá do soustavy menší hodnotu zisku než prvek předchozí, který se nachází blíže k LPDA soustavě. „*Teoretické výpočty a měření intenzity pole potvrzují, že zisk 7 - prvkové antény LPY (4 LPDA + 3 Yagi-Uda) v úzkém pásmu činí až 11,36 dBd . 5,36 dBd (LPDA) + 4 dB (D1)+1,5 dB (D2)+0,5 dB (D3) = 11,63 dBd*“.[1]Svoji roli hrají i aktivní prvky LPDA. Počet prvků struktury LPDA je určen požadovanou šířkou pásma. Pro většinu amatérských pásem krátkých vln i velmi krátkých vln je optimální počet prvků čtyři. „*Anténa LPDA může mít mnoho prvků, ale její zisk se nezvyšuje s jejich stoupajícím počtem, nezbytným pro širokopásmový provoz. Zisk je úměrný počtu prvků rezonujících v kmitočtové oblasti pracovního pásma. Obvykle to jsou 4 prvky*“.[1] Proto se zvětšování počtu prvků struktury LPDA z tohoto hlediska jeví jako neopodstatněné. Návrh a výpočet antény LPY je nutné provádět odděleně v rámci části LPDA a v rámci části Yagi-Uda. Stejně jako u Yagi-Uda, tak i u antén LPY je možno přidat reflektor. Přidáním reflektoru se významně ovlivní předozadní poměr až na maximálních 25 dB, můžeme tedy počítat i se zvýšením celkového zisku. Přidáním reflektoru a direktorů se sníží impedance antény LPY, ale méně dramaticky, než je tomu u antény Yagi-Uda. Při typických hodnotách parametrů  $\tau = 0,94$  a  $\sigma = 0,55$  je impedance 7 prvkové antény LPY cca  $200 \div 300 \Omega$ . Pro impedanční přizpůsobení a symetrizaci se používá klasický balun na prstencovém jádře, nebo symetrizační smyčka  $\lambda/2 \cdot k$ . Anténu je pak možné napájet koaxiálním kabelem s impedancí  $50 \Omega$ . [1][2][5]

V zahraničí se začíná hojně využívat tento typ antény v komerční oblasti. LPY antény je možno využít za podmínek, že obě komunikující radiostanice mají stálá stanoviště. Svoje uplatnění našla tato anténa např. u profesionálních radiostanic pro pásmo cca 80 MHz. Rozměry antény umožňují snadnou montáž za okna budov. Využití této antény je především v typickém radioamatérském pásmu velmi krátkých vln. Typicky se toto pásmo využívá pro televizní vysílání, nebo pro různé sdělovací služby krátkého dosahu jako je třeba sanitní služba, hasiči, policie a další.

### 2.3.1 Porovnání vlastností a konstrukce antén LPY a LPDA a Yagi-Uda

U Yagi-Uda antény je napájen jen jeden prvek, u LPY je napájeno více prvků (aktivní prvky LPDA) Yagi-Uda a. má velmi úzkou šířku pásma. LPDA je širokopásmová. Yagi-Uda anténa má mnohem větší zisk, než LPDA při stejném počtu prvků. Pokud se uskuteční srovnání Yagi-Uda a LPDA při stejných délkách ráhna obou antén pak LPDA má větší zisk. Rozdíly mezi vzdálenostmi Yagi-Uda prvků jsou různé a zároveň ve velikostech prvků nejsou velké rozdíly. Naopak u antén LPDA je od nejdelšího prvku každý následující vždy o určitou část kratší, stejně jako jejich vzájemná rozteč. Pokud přidáme direktor k 4-prvkové LPDA, získáme maximálně 4 dBi. Pokud ovšem přidáme další direktor k 2-prvkové Yagi-Uda získáme maximálně dalších 2,5 dBi. Je patrné, že po přidání direktoru k LPDA získáme o 1,5 dBi více, než přidáním direktoru k 2-prvkové Yagi-Uda. LPY má lepší zisk, než Yagi-Uda anténa, protože LPDA struktura lépe osvětluje svoje direktory.[2]

### 2.3.2 Přehled základních parametrů a vzorců pro výpočet antény LPY

$\alpha$  - polovina vrcholového úhlu logaritmicko periodické struktury

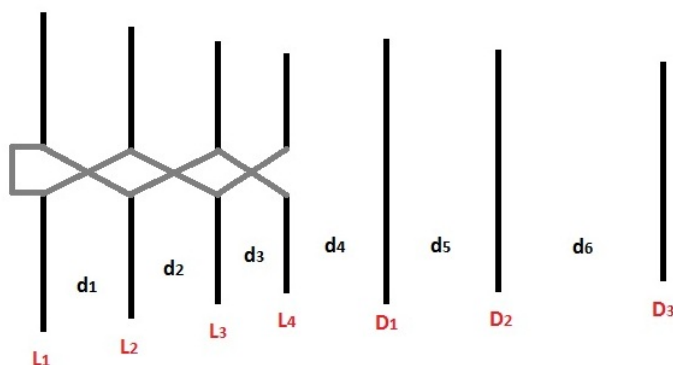
$\tau$  - koeficient geometrické řady ( $\tau < 1$ ), doporučená hodnota na anténu LPY a pro jedno pásmo  $\tau = 0,85 \div 0,94$ .

$\sigma$  - geometrická konstanta relativní vzdálenosti mezi prvky, doporučená hodnota na anténu LPY a pro jedno pásmo  $\sigma = 0,05 \div 0,06$ .

Zdánlivě malou změnou parametrů  $\alpha$ ,  $\tau$ ,  $\sigma$  dochází k velkým změnám v konstrukci antény LPY. Tak například zvýšení  $\tau$  na 0,95 a  $\sigma$  na 0,08 si vyžádá 6 prvků LPDA struktury. Délka antény se prodlouží o 60 %, ale nárůst zisku pouze 0,5 dBi. Optimální parametry získáme, pokud použijeme 4 prvkovou anténu LPDA a to za předpokladu, že  $\tau = 0,94$  a  $\sigma = 0,06$ . Tato základní soustava nám dá zisk 5,4 dBi.

K výpočtu struktury LPDA v rámci antény LPY použijeme parametry  $\tau$  a  $\sigma$ . Nejprve musíme vypočítat nejdelší prvek struktury LPDA.

$$L_1 = \frac{150}{f} [\text{m}] \quad (2.1)$$



Obrázek 2.9: Jednoduché schéma LPY antény

Délky dalších prvků počítáme následovně:

$$L_2 = L_1 \cdot \tau [\text{m}] \quad (2.2)$$

$$L_3 = L_2 \cdot \tau [\text{m}]$$

$$L_4 = L_3 \cdot \tau [\text{m}]$$

Pro určení roztečí ( $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ ) mezi prvky je nutné nejprve vypočítat  $\cotg \alpha$

$$\cotg \alpha = \frac{4\sigma}{(1-\tau)} [-] \quad (2.3)$$

Pro výpočet mezery mezi prvky  $L_1$  a  $L_2$  použijeme:

$$d_1 = 0,5(L_1 - L_2)\cotg \alpha [\text{m}] \quad (2.4)$$

Další mezery mezi prvky jsou dány vzorcem:

$$d_2 = D_1 \cdot \tau [\text{m}] \quad (2.5)$$

$$d_3 = D_2 \cdot \tau \text{ [m]}$$

Výpočet Yagi-Uda struktury v rámci antény LPY:

Rozměry direktorů  $D_1, D_2, D_3$  a vzdálenosti mezi nimi jsou stanoveny empiricky:[1]

$$D_1 = 0,45 \lambda \text{ [m]} \quad (2.6)$$

$$D_2 = 0,44 \lambda \text{ [m]}$$

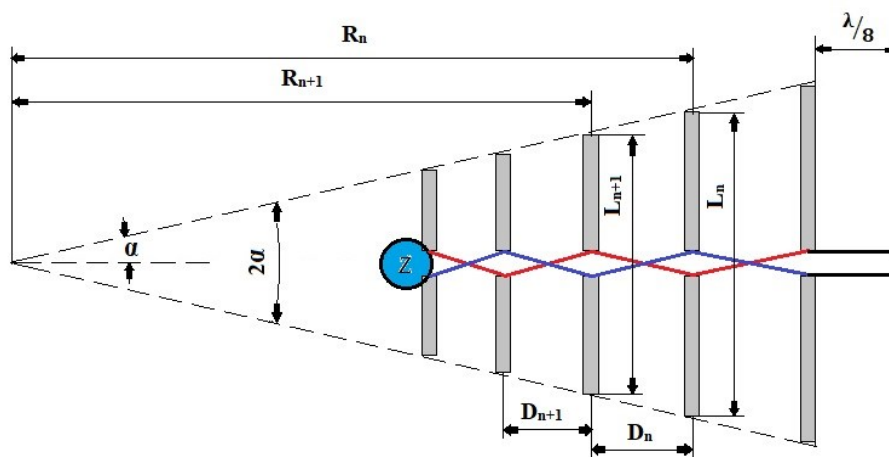
$$D_3 = 0,43 \lambda \text{ [m]}$$

Vzdálenost mezi prvky  $d_4$  (mezi  $L_4$  a  $D_1$ ),  $d_5$  (mezi  $D_1 D_2$ ),  $d_6$  (mezi  $D_2 D_3$ ) se vypočte:[1][2]

$$d_4 = 0,15 \lambda \text{ [m]} \quad (2.7)$$

$$d_5 = 0,15 \lambda \text{ [m]}$$

$$d_6 = 0,3 \lambda \text{ [m]}$$



Obrázek 2.10: Schéma struktury LPDA

$$\tau = \frac{R_{n+1}}{R_n} = \frac{D_{n+1}}{D_n} = \frac{L_{n+1}}{L_n} [-] \quad (2.8)$$

kde

$L$  – rozměr prvků LPDA

$D$  – vzdálenost mezi prvky

$R$  – vzdálenost prvků od vrcholu uhlu  $\alpha$

$$\sigma = \frac{1-\tau}{4 \tan \alpha} [-] \quad (2.9)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[ \frac{1-\tau}{4\sigma} \right] [-] \quad (2.10)$$



Rovnice pro výpočet šířky pásma aktivní oblasti:[22]

$$B_{ar} = 1,1 + 7,7(1 - \tau)^2 \cotg \alpha \quad [-] \quad (2.11)$$

$$B_s = B \cdot B_{ar} = B[1,1 + 7,7(1 - \tau)^2 \cotg \alpha] \quad [-] \quad (2.12)$$

kde

$B_s$  je navržená šířka pásma ( $B_s =$  v praxi o něco větší než  $B$ )  $[-]$

$B$  je požadovaná (potřebná) šířka pásma  $[-]$

$B_{ar}$  je aktivní šířka pásma  $[-]$

Celková délka struktury od nejkratšího prvku po ten nejdelší:[22]

$$L = \frac{\lambda_{max}}{4} \left( 1 - \frac{1}{B_s} \right) \cotg \alpha \lambda_{max} = \frac{c}{f_{min}} \quad [m] \quad (2.13)$$

Počet prvků LPDA struktury:[22]

$$N = 1 + \frac{\ln(B_s)}{\ln(1/\tau)} \quad [-] \quad (2.14)$$

Pokud se ve výsledku objeví za desetinou čarou více než 0.3, musí být celé číslo zaokrouhleno nahoru.

Mezera mezi dvěma tyčemi na společné ose ( $s$ ):

$$s = d \cdot \cos \left( \frac{Z_o}{120} \right) \quad [m] \quad (2.15)$$

kde

$Z_o$  je charakteristická impedance přívodního vedení $[\Omega]$

Zkratovací smyčka ( $Z\tau$ ) se vypočítá:

$$Z\tau = \frac{\lambda_{max}}{8} \quad [m] \quad (2.16)$$

### 3 Výpočet a simulace Logaritmicko periodické Yagi-Uda antény

Následující kapitola se zabývá výpočtem rozměrů Logaritmicko periodické Yagi-Uda antény. Teoretické výpočty byly popsány v předchozí kapitole, tato kapitola se bude zabývat konkrétními výpočty rozměrů Logaritmicko periodické Yagi-Uda antény. Výpočty antény LPY jsou rozděleny na dvě části. Nejdříve výpočet struktury LPDA a následně výpočet struktury Yagi-Uda.

K výpočtu struktury LPDA v rámci antény LPY použijeme parametry  $\tau$  a  $\sigma$  a nejnižší frekvenci dle zadání bakalářské práce. Nejprve musíme vypočítat nejdelší prvek  $L_1$  struktury LPDA. Jelikož jakákoli změna parametrů  $\tau$  a  $\sigma$  vyvolá velké změny v konstrukci antény, bylo nutné za účelem rychlejších výpočtů vytvořit v Excelu matematickou strukturu, která výpočty prováděla automaticky jen na základě změny vstupních údajů. Viz. Příloha S:

#### 3.1.1 Výpočet LPDA části

$$L_1 = \frac{150}{f} = \frac{150}{144} = 1,042 \text{ m} \quad (3.1)$$

$$\sigma = 0,055 \quad (3.2)$$

$$\tau = 0,915 \quad (3.3)$$

Délky dalších prvků počítáme následovně:

$$L_2 = L_1 \cdot \tau = 1,042 \cdot 0,915 = 0,953 \text{ m} \quad (3.4)$$

$$L_3 = L_2 \cdot \tau = 0,979 \cdot 0,915 = 0,872 \text{ m} \quad (3.5)$$

$$L_4 = L_3 \cdot \tau = 0,872 \cdot 0,915 = 0,798 \text{ m} \quad (3.6)$$

Pro určení roztečí ( $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ ) mezi prvky je nutné nejprve vypočítat  $\cotg \alpha$ :

$$\cotg \alpha = \frac{4\sigma}{(1-\tau)} = \frac{4 \cdot 0,055}{(1-0,915)} = 2,588 \quad (3.7)$$

Pro výpočet mezery mezi prvky  $L_1$  a  $L_2$  použijeme:

$$d_1 = 0,5(L_1 - L_2) \cotg \alpha = 0,5(1,042 - 0,953) \cdot 2,588 = 0,115 \text{ m} \quad (3.8)$$

Další mezery mezi prvky jsou dány vzorcem:

$$d_2 = d_1 \cdot \tau = 0,115 \cdot 0,915 = 0,105 \text{ m} \quad (3.9)$$

$$d_3 = d_2 \cdot \tau = 0,108 \cdot 0,915 = 0,096 \text{ m} \quad (3.10)$$

Rovnice pro výpočet šířky pásma aktivní oblasti:

$$B = \frac{F_n}{F_1} = \frac{155}{144} = 1,076 \quad (3.11)$$

$$B_{ar} = 1.1 + 7.7(1 - \tau)^2 \cot \alpha = 1,1 + 7,7(1 - 0,915)^2 \cdot 2,588 = 1,244 \quad (3.12)$$

$$B_s = B \cdot B_{ar} = 1,076 \cdot 1,244 = 1,339 \quad (3.13)$$

Počet prvků LPDA struktury:

$$N = 1 + \frac{\ln(Bs)}{\ln(1/\tau)} = 1 + \frac{\ln(1,339)}{\ln(1/0,915)} = 4,286 \quad (3.14)$$

Mezera mezi dvěma tyčemi na společné ose (s):

$$s = d \cdot \cos\left(\frac{Z_o}{120}\right) = 0,003 \cdot \cos\left(\frac{50}{120}\right) = 0,00549 \text{ m} = 5,49 \text{ mm} \quad (3.15)$$

Zkratovací smyčka ( $Z\tau$ ) se vypočítá:

$$Z\tau = \frac{\lambda_{max}}{8} = \frac{2,082}{8} = 0,260 \text{ m} \quad (3.16)$$

### 3.1.2 Výpočet Yagi-Uda části

Koeficienty a kompenzace ráhna

- Pro délku ráhna, jež pro navrhovanou anténu činí 1,6 m je kompenzace přibližně 0,0075. [5]

$$L_1 = (0,45 + 0,0075) \lambda = 0,4575 \lambda \quad (3.17)$$

$$L_3 = (0,44 + 0,0075) \lambda = 0,4475 \lambda \quad (3.18)$$

$$L_3 = (0,43 + 0,0075) \lambda = 0,4375 \lambda \quad (3.19)$$

Rozměry direktorů  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  a vzdálenosti mezi nimi:

$$D_1 = 0,4575 \lambda = 0,4575 \cdot 2,082 = 0,9525 \text{ m} \quad (3.20)$$

$$D_2 = 0,4475 \lambda = 0,4475 \cdot 2,082 = 0,9317 \text{ m} \quad (3.21)$$

$$D_3 = 0,4375 \lambda = 0,4375 \cdot 2,082 = 0,9109 \text{ m} \quad (3.22)$$

Vzdálenost mezi prvky  $d_4$  (mezi  $L_4$  a  $D_1$ ),  $d_5$  (mezi  $D_1$  a  $D_2$ ),  $d_6$  (mezi  $D_2$  a  $D_3$ ) se vypočte:

$$d_4 = 0,15 \lambda = 0,312 \text{ m} \quad (3.23)$$

$$d_5 = 0,15 \lambda = 0,312 \text{ m} \quad (3.24)$$

$$d_6 = 0,3 \lambda = 0,625 \text{ m} \quad (3.25)$$

### 3.2 Simulace v programu

Pro simulaci logaritmicko periodické Yagi-Uda antény byl použit program pro modelování antén 4NEC2. Další podobné jednodušší programy jsou například: EzNec, 4NEC a SuperNEC. Mezi výhody programů 4NEC a 4NEC2 patří to, že jsou volně přístupné, nevznikají tedy žádné problémy s licencí. Při potřebě složitějších programů je možné využít například: „CST Microwave studio” nebo „Zeland IE3D”. Jde o komerční programy, které mají velmi široké možnosti použití.

Tabulka 3.1 Základní parametry antény LPY

název	jednotka, značka	rozměr, hodnota	název	jednotka, značka	rozměr, hodnota
geometr. řada	$\tau$	0,915	mezera L2 - L3	d2	0,105 m
geom. konstanta	$\sigma$	0,055	mezera L3 - L4	d3	0,096 m
LPDA prvek	L1	1,042 m	mezera L4 - D1	d4	0,312 m
LPDA prvek	L2	0,953 m	mezera D1 - D2	d5	0,312 m
LPDA prvek	L3	0,872 m	mezera D2 - D3	d6	0,625 m
LPDA prvek	L4	0,798 m	šířka pásma	B	1,076
Yagi direktor	D1	0,953 m	aktivní šířka	$B_{ar}$	1,244
Yagi direktor	D2	0,932 m	navržená šířka	$B_s$	1,339
Yagi direktor	D3	0,911 m	počet LPDA	N	4,286
	$\cotg \alpha$	2,588	mezera	s	5,49 mm
mezera L1 - L2	d1	0,115	pahýl	$Z\tau$	0,26 m

Jako první je nutné zadat vypočítané délky prvků antény a jejich vzdálenosti od sebe. V záložce „Symbols” si vytvoříme proměnné, jež představují velikosti a délky jednotlivých prvků od sebe. Zadávané údaje jsou v metrech.

Symbols		
Nr	Symbols and equations	comment
1	lpda1=0.5206	
2	lpda2=0.4764	
3	lpda3=0.4359	
4	lpda4=0.3988	
5	yagi1=0.47636	
6	yagi2=0.46594	
7	yagi3=0.45553	
8	delka1=0.1145	
9	delka2=0.2193	
10	delka3=0.3152	
11	delka4=0.6276	
12	delka5=0.94	
13	delka6=1.5647	

Obrázek 3.1: Vytvořené proměnné

Do sloupců Y1 a Y2 je nutné zadat polovinu délky sedmi prvků antény LPY v záporné a kladné hodnotě. Dále do sloupců X1 a X2 je nutné napsat vzdálenosti mezi jednotlivými prvky. Do těchto sloupců (X1,X2) uvádíme vzdálenosti z bodu 0. Takže vzdálenost mezi prvky je nutné postupně přičítat.

Symbols		Geometry		Source/Load		Freq./Ground		Others		Comment	
Geometry (Scaling=Meters)											<input type="checkbox"/> Use wire tapering
Nr	Type	Tag	Segs	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Radius	
1	Wire	1	99	0	-lpda1	0	0	lpda1	0	3.e-3	
2	Wire	2	99	delka1	-lpda2	0	delka1	lpda2	0	3.e-3	
3	Wire	3	99	delka2	-lpda3	0	delka2	lpda3	0	3.e-3	
4	Wire	4	99	delka3	-lpda4	0	delka3	lpda4	0	3.e-3	
5	Wire	5	99	delka4	-yagi1	0	delka4	yagi1	0	3.e-3	
6	Wire	6	99	delka5	-yagi2	0	delka5	yagi2	0	3.e-3	
7	Wire	7	99	delka6	-yagi3	0	delka6	yagi3	0	3.e-3	

Obrázek 3.2: Geometrie Antény

Následně nastavíme zdroj antény v záložce „Source/Load“. Zdroj nastavíme na nejmenší prvek LPDA části a poté tento prvek propojíme s ostatními prvky LPDA části tak, aby se fáze na každém dalším prvku otočila o  $180^\circ$ . Toho docílíme překřížením kabelu, ukázáno na obrázku 2.9. Napájení LPDA antény bylo popsáno v kapitole 2.2.

Symbols		Geometry		Source/Load		Freq./Ground		Others		Comment		
Source(s)										<input checked="" type="checkbox"/> Show source	<input type="checkbox"/> Show loads	<input checked="" type="checkbox"/> Show Tr-line
Nr	Type	Tag	Seg	(opt)	Real	Imag	Magn	Phase	(norm)		comment	
1	Voltage-src	4	50	0	1	0	1	0				

Trans-lines												
Nr	Type	Tag-1	Seg-1	Tag-2	Seg-2	Z0	Len	End-1(G)	(B)	End-2(G)	(B)	comment
1	Trans-line	4	50	3	50	-50	0	Open		Open		
2	Trans-line	3	50	2	50	-50	0	Open		Open		
3	Trans-line	2	50	1	50	-50	0	Open		Open		

Obrázek 3.3: Napájení antény

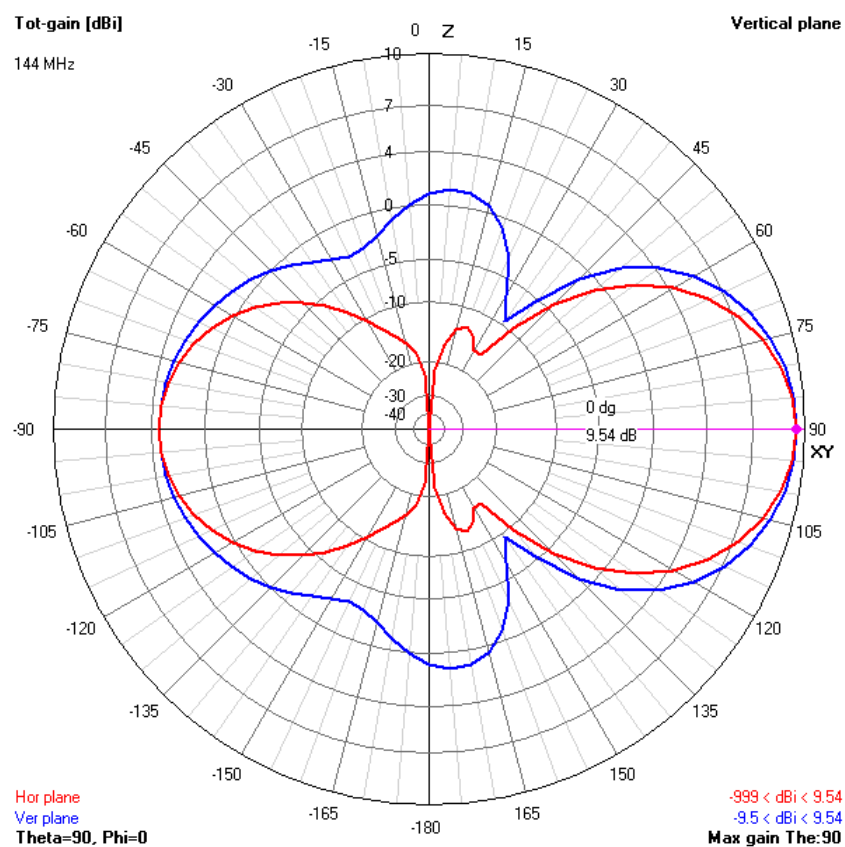
Jako poslední nastavíme požadovanou frekvenci a nastavíme prostředí. Ve většině simulací si vystačíme s „Free-space“, jež je ideální, ale nerealistické nastavení. Pokud bychom chtěli anténu odsimulovat v realističtějším prostředí, je možno vybrat „real ground“ v části „environment“.

Symbols	Geometry	Source/Load	Freq./Ground	Others	Comment
<b>Frequency</b> Frequency <input type="text" value="144"/> Mhz Nr steps <input type="text"/> <input type="checkbox"/> Sweep Stepsize <input type="text"/>					
<b>Environment</b> Ground / Free-space <input type="text" value="Free-space"/> <input type="checkbox"/> Connect wire(s) for Z=0 to ground					
<b>Main ground</b> Ground type <input type="text"/> Conductivity <input type="text"/> Diel constant <input type="text"/> <input type="checkbox"/> Use ground-screen <input type="checkbox"/> Use second ground					
<b>Ground screen</b> Nr of radials <input type="text"/> Radial length <input type="text"/> mtr Wire radius <input type="text"/> mm					
<b>Second ground</b> Ground type <input type="text"/> Conductivity <input type="text"/> Diel constant <input type="text"/> Distance <input type="text"/> mtr Depth <input type="text"/> mtr <input type="radio"/> Circular boundary <input type="radio"/> Perpendicular to Y-axis					

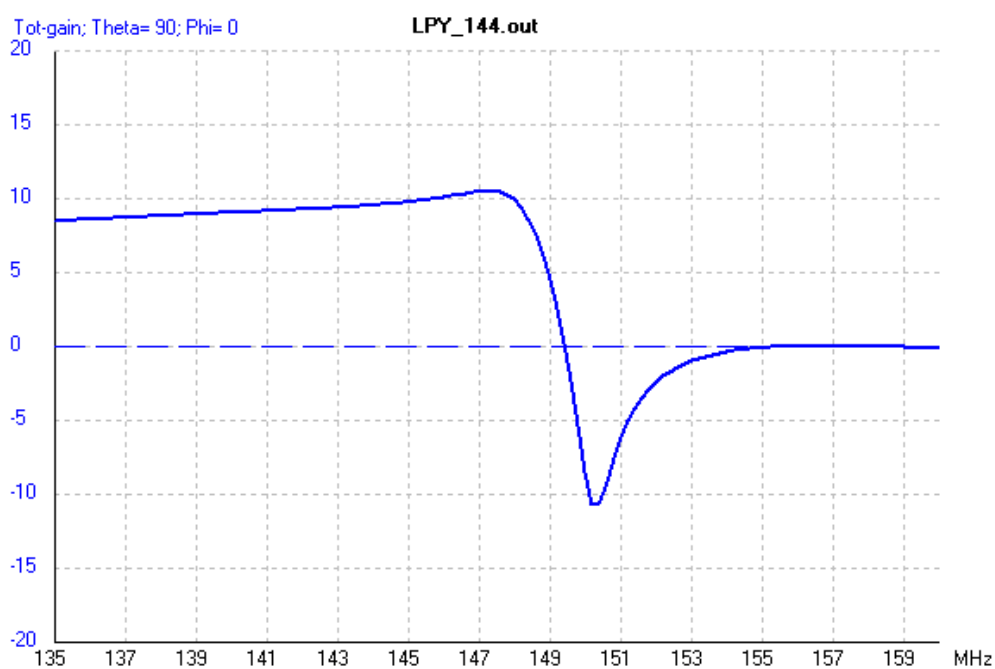
Obrázek 3.4: Nastavení frekvence a prostředí antény

Po sestavení geometrie a sestavení zdroje, můžeme v okně geometrie vidět finální verzi navržené antény. Ukázky geometrie antény jsou uvedeny v příloze.

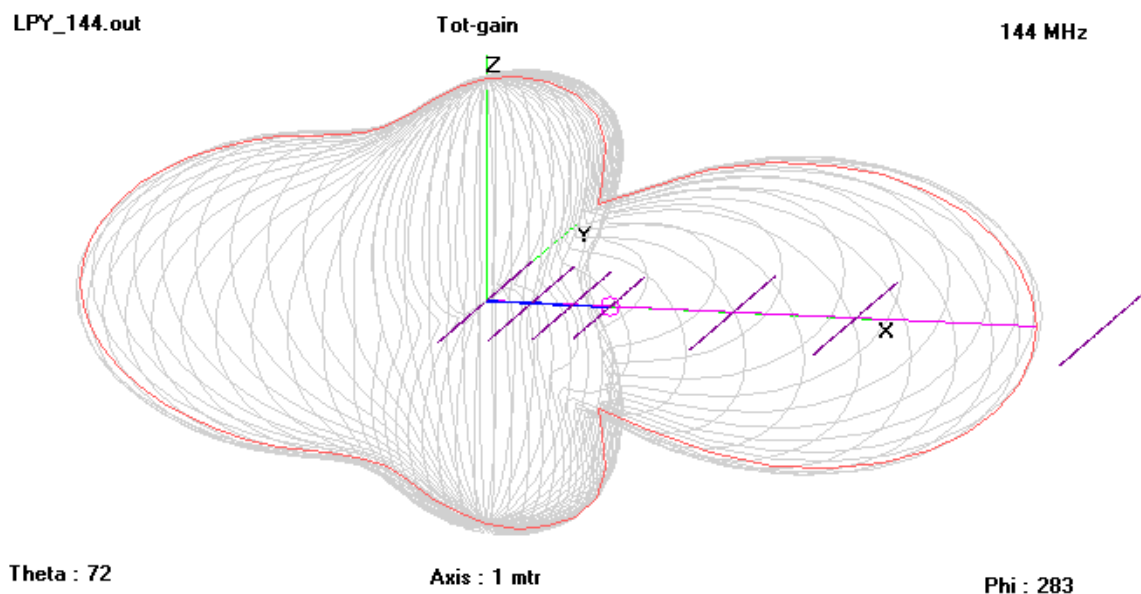
Dopředný zisk antény odpovídá přibližným odhadům, tedy kolem 10 dBi. V diagramu je červenou barvou ukázaný zisk v horizontální rovině a modrou barvou v rovině vertikální.



Obrázek 3.5: Vyzařovací diagram

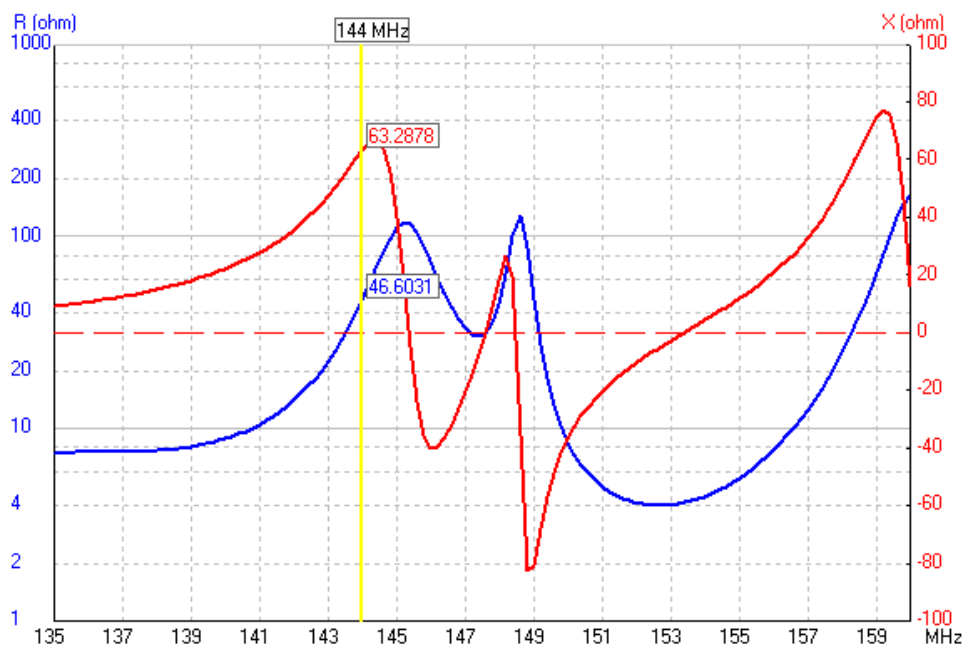


Obrázek 3.6: Graf znázorňující zisk antény ve vztahu k frekvenci



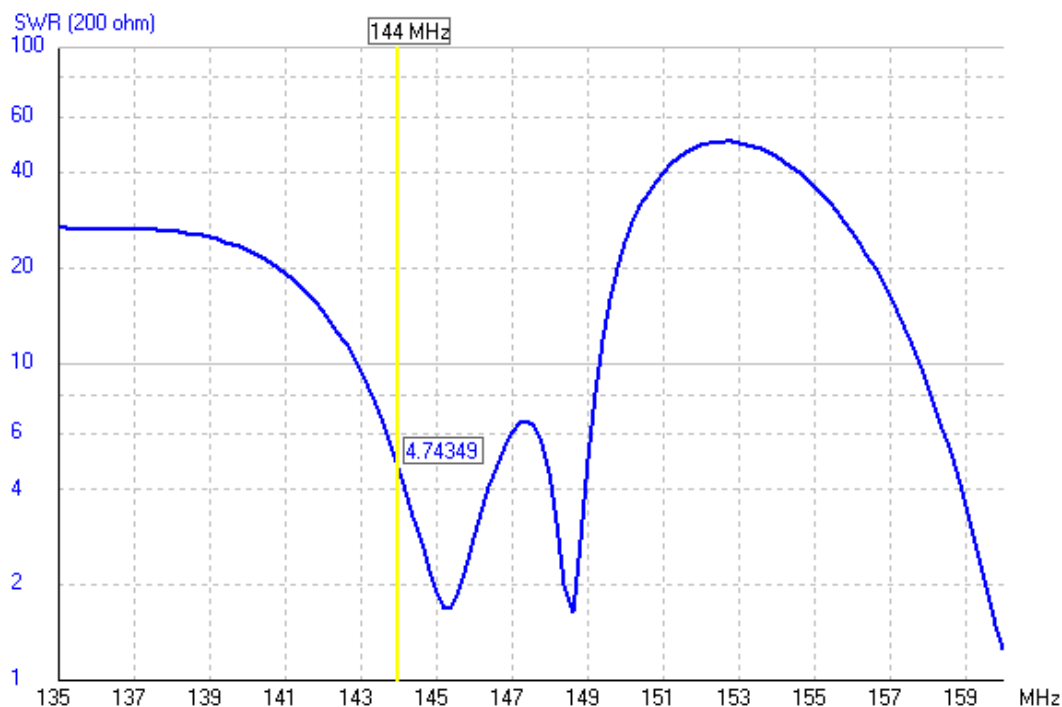
Obrázek 3.7: Vyzařovací diagram 3D sedmi prvkové antény LPY

Výsledek simulace ukazuje na velmi rozkolísané hodnoty impedance ve vztahu se změnou frekvence (osa x). Jak bylo uvedeno v kapitole 2.3, vstupní impedance LPY antény, navržené pro frekvenci 144 MHz, by měla mít impedance od 200 do 300  $\Omega$ . Z výsledků provedené simulace je ale patrné, že se impedance pohybuje kolem 50  $\Omega$ . Pokud srovnáme obě hodnoty vstupní impedance, jedná se o značný rozdíl. Avšak při hodnotě 145 MHz je v grafu hodnota impedance více než 100  $\Omega$ .



Obrázek 3.8: Reálná a imaginární složka impedance v pásmu 135 až 160 MHz

Pro napájení antény bude použit koaxiální kabel  $50\ \Omega$ . Jak bylo popsáno v kapitole 2.3, anténa bude mít vstupní impedanci v rozmezí  $200 - 300\ \Omega$ . Pro přizpůsobení z  $200\ \Omega$  na  $50\ \Omega$  proto použijeme balun 1:4, tedy symetrizační smyčku  $1/2\ \lambda$ . V simulacích tedy můžeme nastavit jako vstupní impedanci  $200\ \Omega$ . Poměr stojatých vln je v požadované frekvenci 4,74 PSV, což je absolutně nedostačující pro praktické využití. Nejlepší PSV je v 145,2 MHz a jeho hodnota dosahuje 1,7 PSV.



Obrázek 3.9: Poměr stojatých vln antény

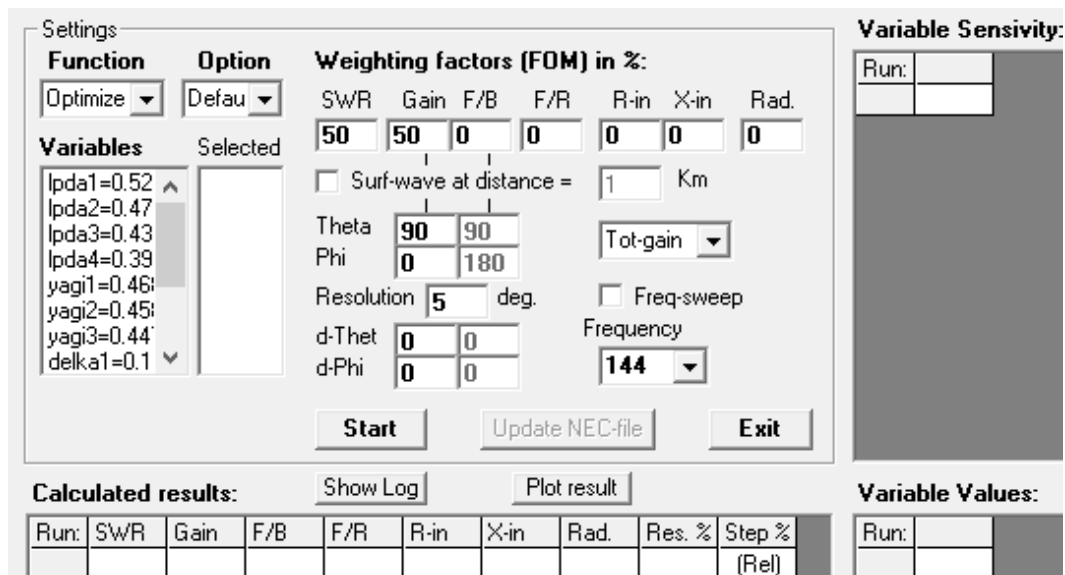


Obrázek 3.10: Činitel odrazu



### 3.3 Optimalizace Antény

Dalším krokem pro zlepšení antény je optimalizace. Tu je možno vykonat přímo v programu 4NEC2 pomocí tlačítka „Start optimizer”. Následně stačí vybrat parametry, s kterými bude optimizer pracovat. Ve „Weighting factors” poté najdeme záložky jako například: „SWR, Gain, R-in ,atd.”, jež se nastavují v procentech a slouží k určení důležitosti. Když tedy nastavíme gain na 100% algoritmus se bude zaměřovat pouze na vylepšení zisku.

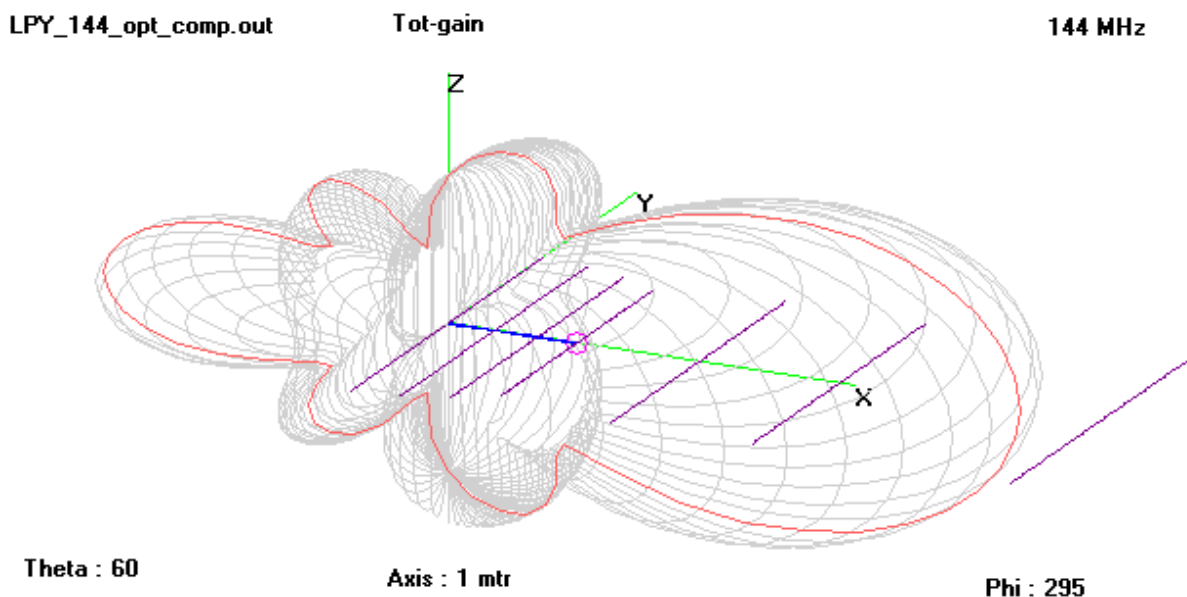


Obrázek 3.11: 4NEC2 optimizer

Tabulka 3.2: Rozměry LPY antény před a po optimalizaci

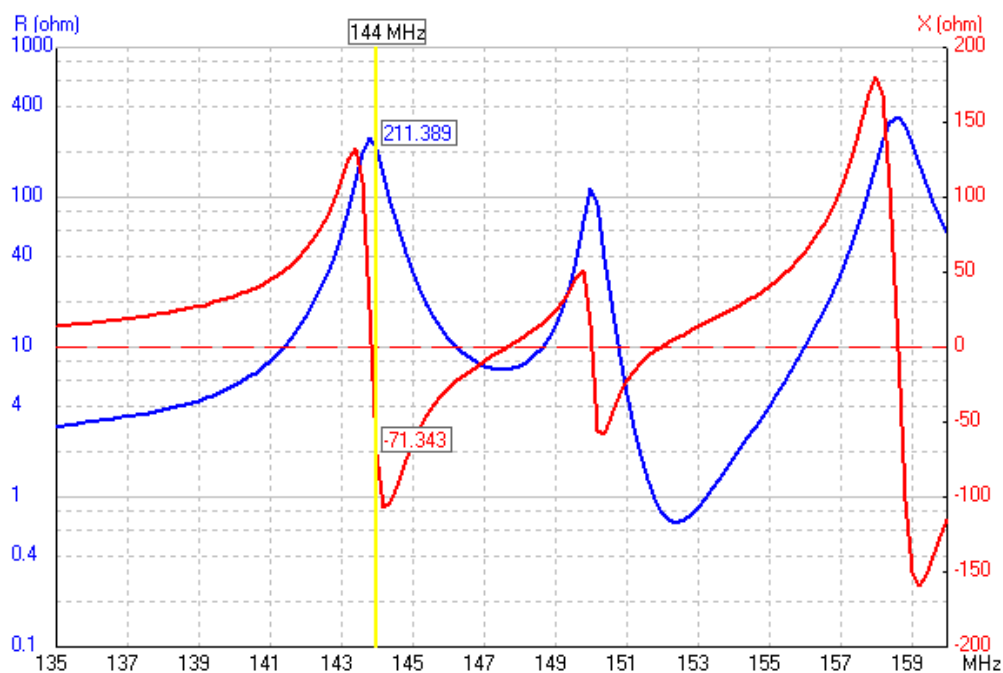
název	značka	před optimalizací	po optimalizaci
LPDA prvek	L1	1,042 m	1,014 m
LPDA prvek	L2	0,953 m	0,983 m
LPDA prvek	L3	0,872 m	0,911 m
LPDA prvek	L4	0,798 m	0,798 m
Yagi direktor	D1	0,953 m	0,92 m
Yagi direktor	D2	0,932 m	0,919 m
Yagi direktor	D3	0,911 m	0,924 m
mezera L1 - L2	d1	0,115m	0,115m
mezera L2 - L3	d2	0,11 m	0,105 m
mezera L3 - L4	d3	0,092 m	0,096 m
mezera L4 - D1	d4	0,301 m	0,299 m
mezera D1 - D2	d5	0,355 m	0,345 m
mezera D2 - D3	d6	0,587 m	0,633 m

Vyzařovací charakteristika v 3D zobrazení při zadání rozměrů antény LPY vzešlých z analýzy programu 4NEC2 po dokončení optimalizace vykazuje lepší předozadní poměr než anténa před optimalizací.



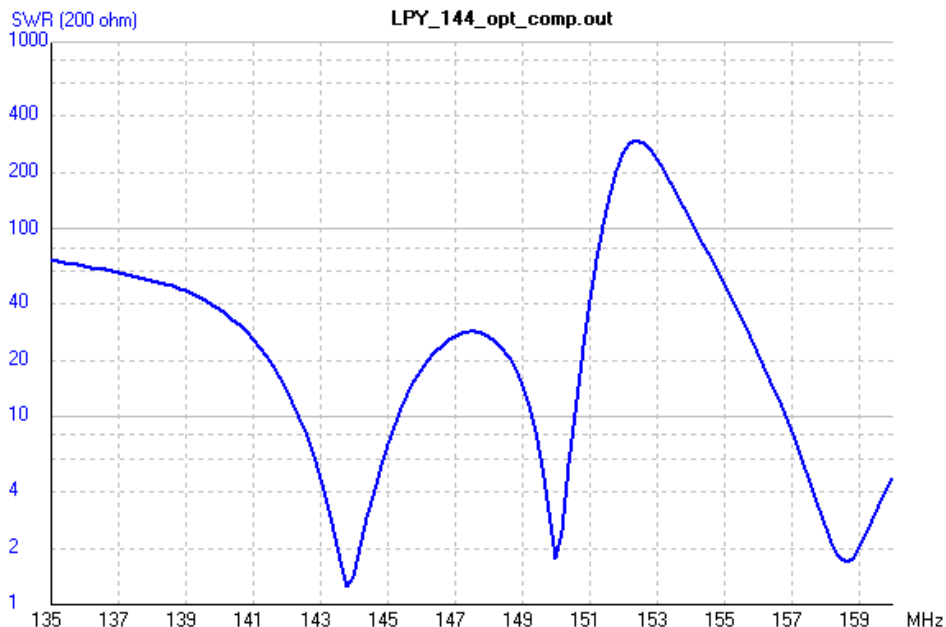
Obrázek 3.12: Vyzařovací charakteristika v 3D po optimalizaci

Na obr. 3.13 vidíme graf vstupní impedance antény, na kterém můžeme pozorovat zlepšení oproti anténě bez optimalizace. Důležité je zvýšení impedance na frekvenci 144 MHz na  $211 - j71 \Omega$  a frekvenci 150 na  $113 + j15 \Omega$ , což naznačuje, že anténa by měla být využitelná v praxi pro frekvence 144 MHz a 150 MHz.

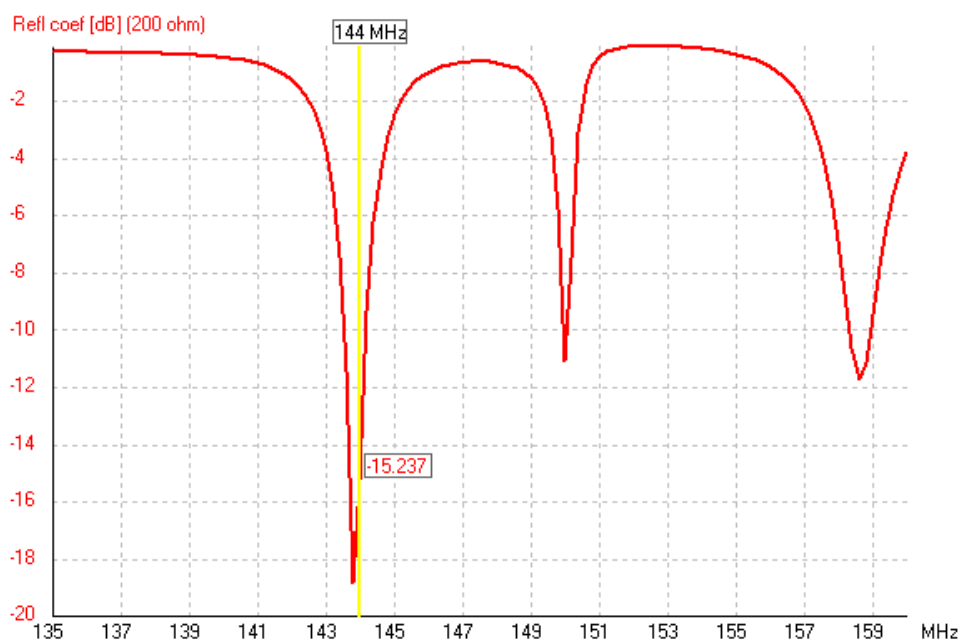


Obrázek 3.13: Vstupní impedance antény po optimalizaci

Po optimalizaci se situace zlepšila na frekvencích 144 a 150 MHz ale zhoršila na zbytku měřených frekvencí. Nejlepší hodnoty anténa vykazuje na 143,8 MHz PSV 1,26 a na 150 MHz PSV 1,7. Hodnota PSV mezi 1,5 až 2 se považuje za dobrou a anténa takto vyladěná za profesionálně zhotovenou.

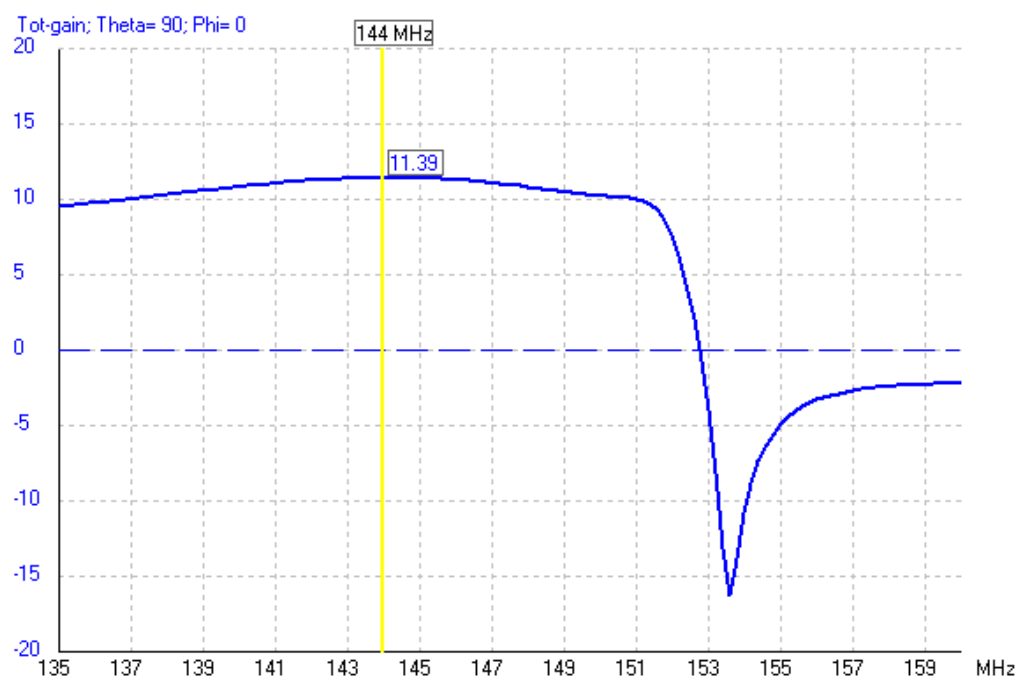


Obrázek 3.14: Poměr stojatých vln antény po optimalizaci



Obrázek 3.15: Činitel odrazu antény po optimalizaci

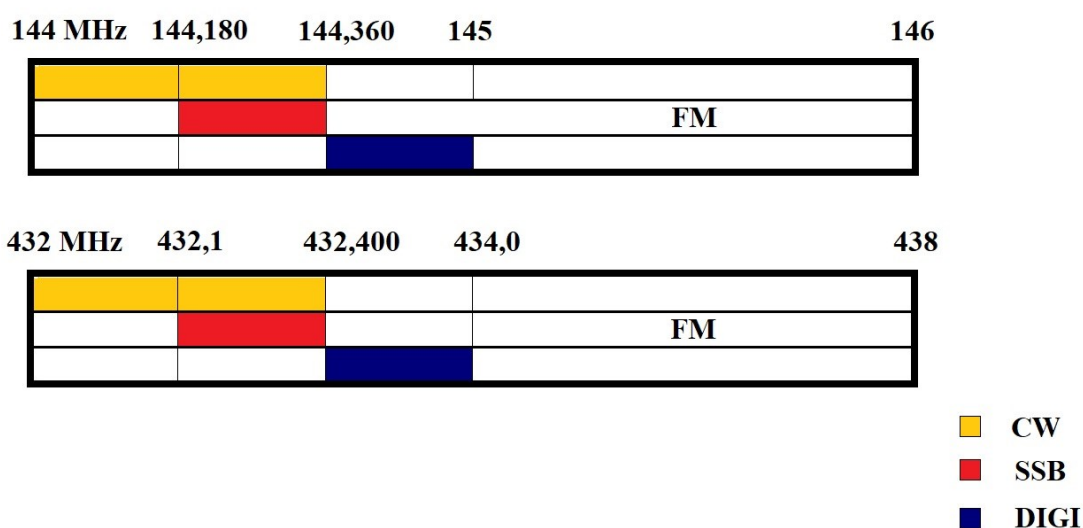
Celkový zisk antény se po optimalizaci zlepšil na 144 MHz z 9,54 dB na 11,39 dB, ale také si můžeme všimnout, že oproti anténě před optimalizací celkový zisk klesá za hranicí 144 MHz.



Obrázek 3.16: Celkový zisk antény po optimalizaci

## 4 Konstrukce a ověření správnosti návrhu antény

Anténa byla navrhována pro pásmo 144 MHz. V tomto pásmu, konkrétně 144 – 146 MHz, probíhá provoz amatérské služby (tyto frekvence používají radioamatéři, kteří složili zkoušku a mají platné radioamatérské oprávnění). Anténa naladěná na radioamatérský provoz na 2 metrech je možno používat i na harmonickém pásmu 70 cm. Pro FM provoz amatérské radiokomunikační služby by bylo nejlépe naladit anténu na frekvenci 145 MHz. Před 144 MHz pásmem se nachází pásmo letecké hlasové komunikace (služba letecká pohyblivá), jež má frekvenci 143,65 – 144 MHz. Službě kosmického výzkumu jsou v kategorii podružné služby přidělena pro sestupný směr pásma v rozsahu 138 – 144 MHz. Nakonec pásmo 146 – 148 MHz je využívanou službou pohyblivou (civilní) a podružně službou leteckou pohyblivou.



Obrázek 4.1: Jednoduchý přehled radioamatérského pásma

### 4.1 Konstrukce – realizace antény

#### Použitý materiál:

- 7 ks. tyčovitého profilu průměr 6 mm, délky 1000 mm, materiál Dural (95% hliník)
- 1 ks. profilu jákl 20 x 20 mm, délka 1800 mm, materiál Dural (95% hliník)
- 1 ks. elektro-instalační krabice
- Lepidlo Patex a dvousložkové pryskyřicové lepidlo
- 1 ks. PL koncovka samice
- 2 ks. PL koncovka samec
- Koaxiální kabel RG 58, celková délka 4 m
- Jednožilový izolovaný měděný drát 1 m
- 3 ks plastové úchyty pro Yagi-Uda prvky
- 3 ks plastové úchyty pro LPDA prvky (vyrobeny z PVC trubky, průměr 20 mm, tloušťka 1,5 mm)

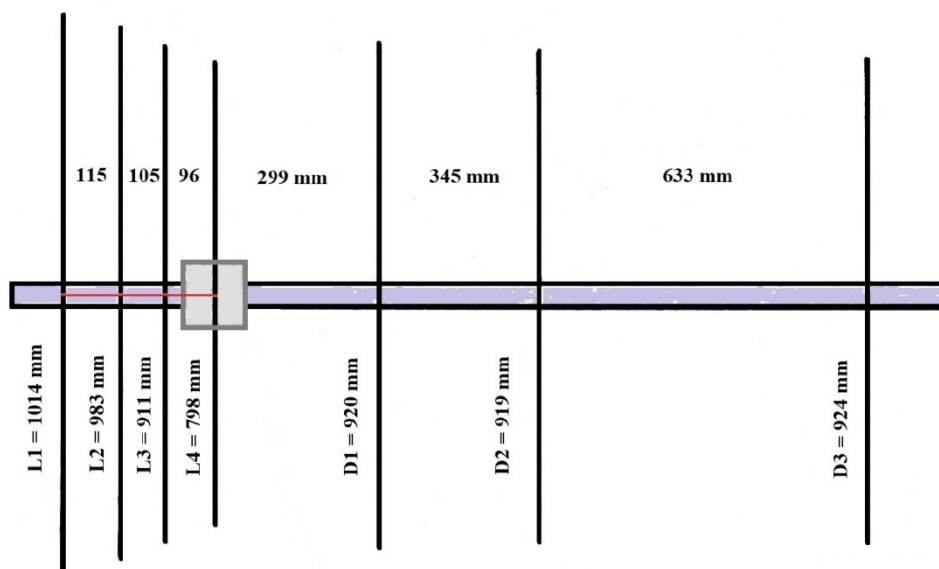
- Šrouby, matice, podložky, očka, materiál pozinkovaná ocel. 12 ks. samořezných šroubků průměr 2,9 mm. 8 ks. šroubů M3 x 15 mm s maticemi M3. 16 ks podložek pro šrouby s průměrem 3 mm
- Cínová pájka 2 mm, materiál 40% cín, 60% olovo; kalafuna
- Samo zatahovací bužírka
- Elektrická izolační páska

**Použité nástroje a měřidla:**

- Posuvné digitální měřidlo (přesnost 0,1 mm)
- Pásmo 5 m (přesnost 1 mm)
- Speciální plynový zapalovač pro zapalování plynu
- Elektrická odporová pájka
- Vrtáčka, vrtáky (průměr 2,5; 3 a 3,5 mm)
- Šroubováky
- Klíče na matice a šrouby
- Kombinačky, kleště
- Pilka na železo
- Pilník
- Nůž na ořezání kabelů
- Nůžky

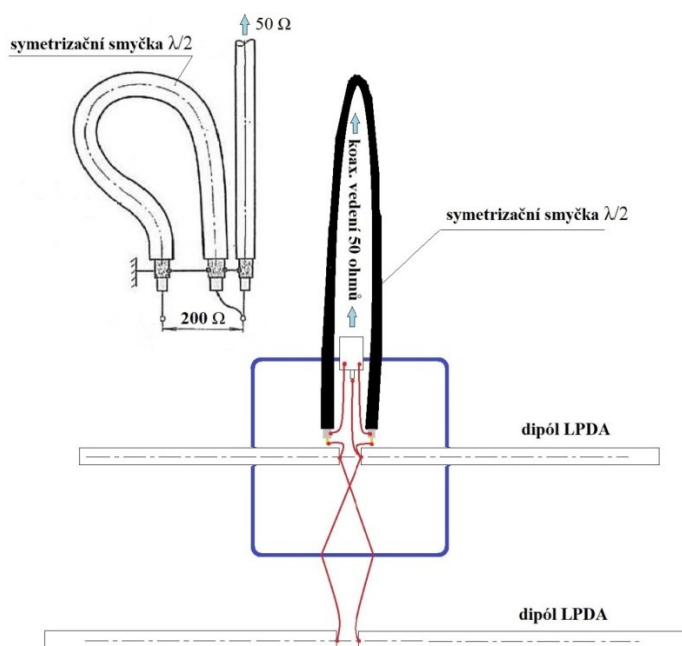
**4.1.1 Postup realizace:**

- Nařezání jednotlivých prvků LPY antény dle vypočtených rozměrů (8 ks. jednotlivých částí LPDA struktury a 3 ks. Yagi-Uda prvků). Provrtání děr doprostřed direktorů Yagi-Uda (3 díry). Provrtání děr do LPDA na kraj každého dipólu (8 děr). Přilepení plastové úchytky k třem kusům Yagi-Uda prvků.
- Výroba plastových úchytů pro LPDA strukturu. Uřezání tří kusů z PVC trubky o průměru 20 mm a délce 140 mm. Následně provést podélné rozstřížení uřezaných plastových trubek. Rozstřížené prvky spojit po dvou kusech. Dále bylo provedeno zahřátí uprostřed plastového úchyty pomocí plynového zapalovače. Dalším krokem bylo zarovnání prostřední části pro účely přichycení na ráhno. Do každého plastového úchyty byly vyvrtány dvě díry o průměru 3 mm pro samořezný šroubek 2,9 mm.
- Vyvrtání 12 děr o průměru 2,5 mm do hliníkového ráhna (jákl 20 x 20 mm). Díry jsou určeny k uchycení Yagi-Uda direktorů, LPDA dipólů a instalační krabičky. Díry byly naměřeny tak, aby odpovídaly mezerám mezi všemi prvky. Do všech těchto děr bude použit samořezný šroubek 2,9 mm.

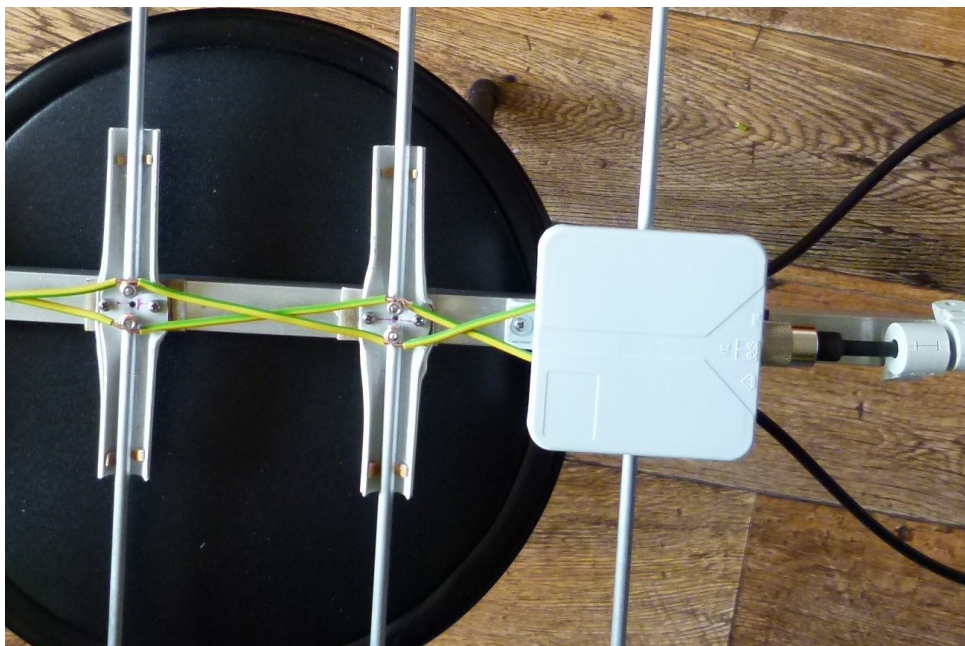


Obrázek 4.2: Rozměry dle optimalizace v programu 4NEC2

- Montáž instalační krabičky. Provrtání 7 výstupů pro přizpůsobovací smyčku a pro propojovací jednožilové kabely a díry pro vsunutí prvního dipólu LPDA. Prostrčení a připevnění těchto posledních nejkratších prvků LPDA dipólů do instalační krabičky pomocí dvousložkového pryskyřicového lepidla. Přimontování koncovky LP samice na instalační krabičku, z výstupem směrem ven, včetně připájení potřebného zapojení napájení a symetrizační smyčky. Připájení jednožilových propojovacích kabelů a připájení koaxiálního kabelu RG 58 (přizpůsobovací smyčka dle vypočtených rozměrů).

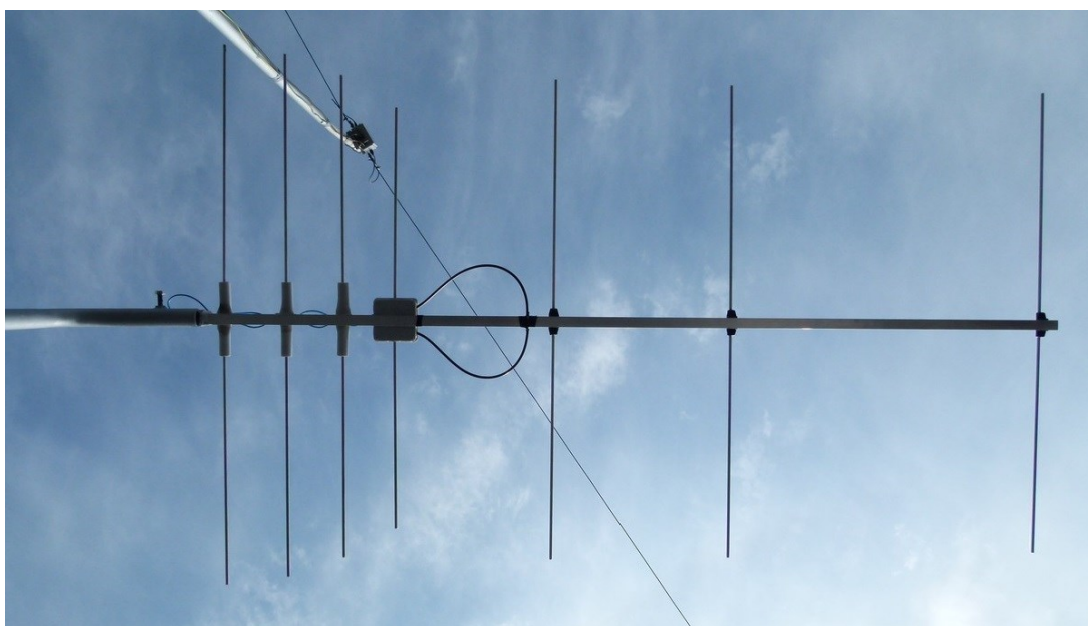


Obrázek 4.3: Schéma zapojení instalační krabičky



Obrázek 4.4: *Praktické provedení uchycení LPDA prvků, jeho zapojení, včetně symetrizační smyčky a propojení prvků pomocí uzemňovacího kabelu*

- Montáž dalších prvků LPDA pomocí plastových úchytů za podmínky dodržení odstupů dle vypočtených rozměrů. Provedení vodivého propojení těchto prvků v blízkosti jednotlivých štěrbin.
- Montáž 3 kusů Yagi-Uda direktorů pomocí plastových úchytů za podmínky dodržení odstupů dle vypočtených rozměrů.
- Výroba prodlužovacího koaxiálního kabelu RG 58 s koncovkami PL samec na obou koncích pro účely měření.



Obrázek 4.5: *Vzhled vyrobené LPY antény*



## 4.2 Měření antény

Tato kapitola se bude zabývat proměřování sestavené antény na základě rozměrů vzešlých z optimalizace programu 4NEC2. Cílem je zjistit hodnoty SWR a hodnoty vstupní impedance. Dále provést porovnání skutečných naměřených hodnot s hodnotami vzešlých z výpočtu a modelování antény. Získáme tedy informace k posouzení užitečnosti antény v praxi.

### Použité přístroje:

- Anténní analyzátor MFJ – 259B
- PSV metr „A & J“
- Transceiver IC 706 MK II G
- R&S® ZND Vector Network Analyzer

Měření probíhalo v reálných podmínkách. Anténa LPY byla připevněna na střeše 10. patrového domu, kde proběhlo zkušební měření.



Obrázek 4.6: Vzhled vyrobené LPY antény

Při tomto měření bylo zjištěno, že hodnoty SWR byly ovlivněny lidským tělem a ukázalo se, že prodlužovací kabel o délce 2 metry je nedostatečný. Proto bylo nutné vyrobit delší prodlužovací koaxiální kabel o délce 5 metrů. Naměřené hodnoty byly vepsány do připravené tabulky. Hodnoty byly odečítány z anténního analyzátoru MFJ 259B.



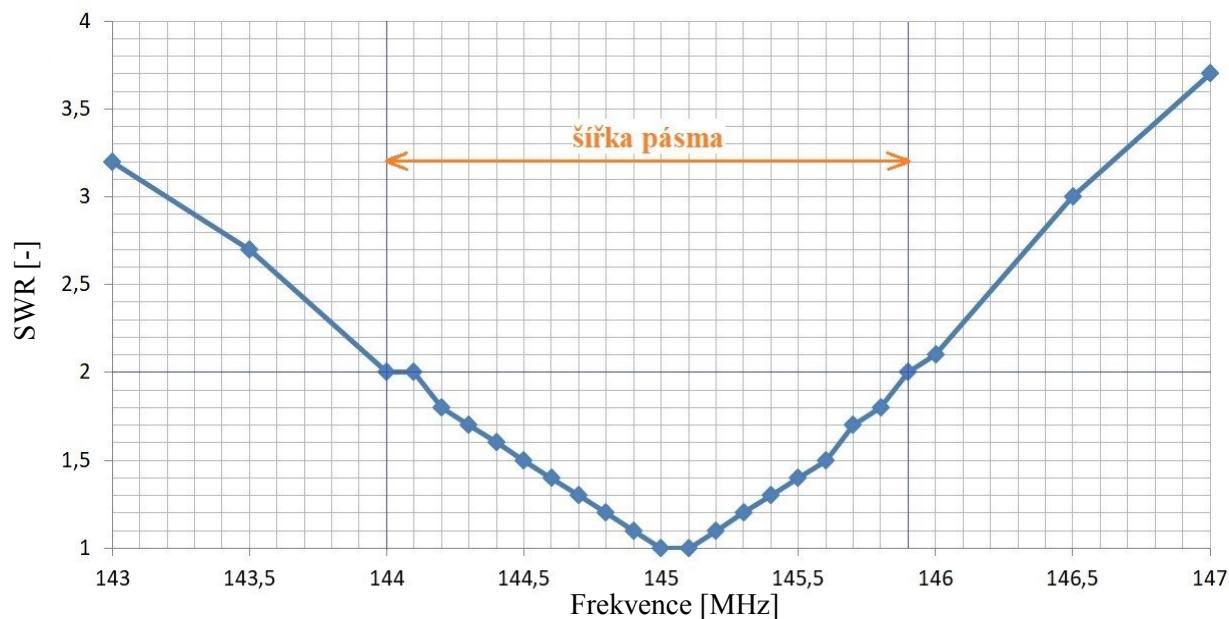
Obrázek 4.7: Anténní analyzátor MFJ 259B

Tabulka 4.1: Změřené hodnoty pomocí anténního analyzátoru MFJ 259B

Poř.	Frekvence [MHz]	SWR	R	X
1.	140	5,4	10	26
2.	140,5	5,1	10	20
3.	141	4,7	10	15
4.	141,5	4,4	10	12
5.	142	4	11	8
6.	142,5	3,6	13	7
7.	143	3,2	16	9
8.	143,5	2,7	20	14
9.	144	2	29	19
10.	144,5	1,5	41	18
11.	145	1	49	2
12.	145,5	1,4	38	-12
13.	146	2,1	23	-13
14.	146,5	3	16	-8
15.	147	3,7	15	-10
16.	147,5	3,4	18	-16
17.	148	3,8	16	-17
18.	148,5	6	13	-27
19.	149	7,3	14	-38
20.	149,5	8,2	17	-51
21.	150	9	21	-64

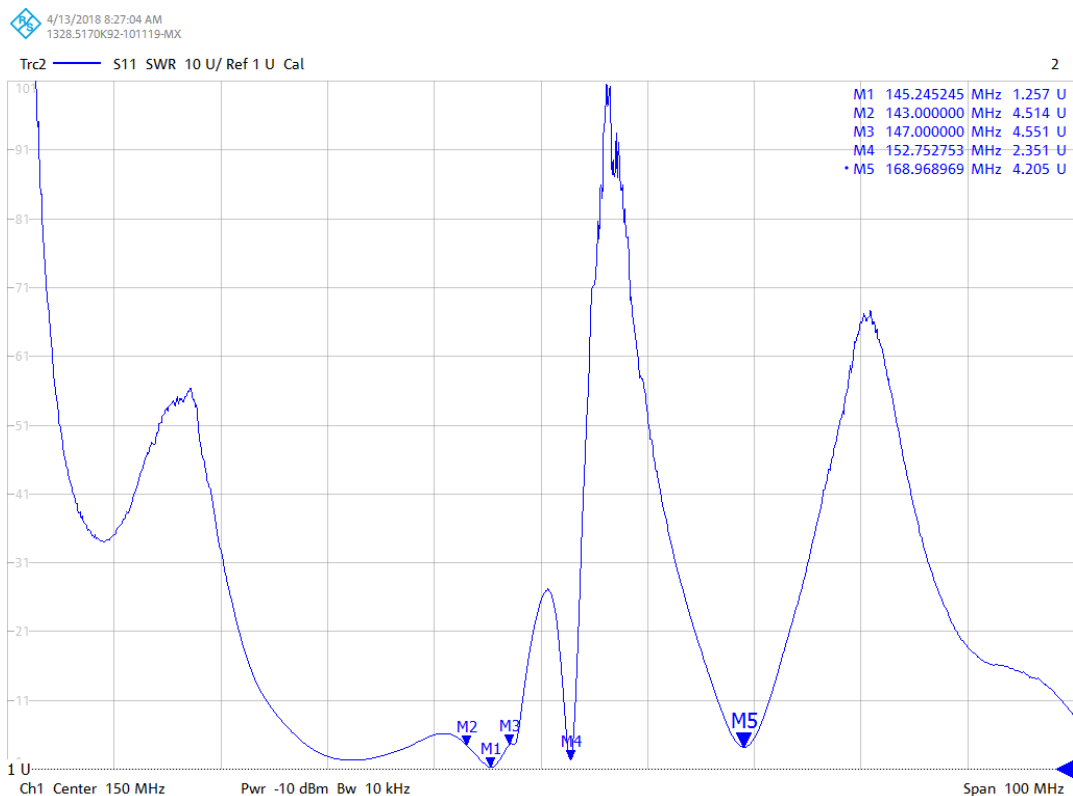
Při měření bylo zjištěno, že pahýl (zkratovací smyčka) výrazně ovlivňuje širépásmovost antény. Při rozpojení pahýlu byla šířka pásma 0,69 MHz při maximální hodnotě SWR 2, tedy poklesu o 3 dB. Kdežto délka pahýlu  $1/8 \lambda$  (tj. celková délka vodiče pahýlu  $1/4 \lambda$ ) zajistila šířku pásma 2 MHz vyhovující  $SWR \leq 2$ . Na obrázku 4.9 vidíme měření radioamatérského pásma 144 – 146 MHz pomocí MFJ 259B analyzátoru na němž je aktivní pásmo zobrazeno.

Závislost SWR na frekvenci



Obrázek 4.8: Graf naměřených hodnot SWR

Na obrázku 4.9 vidíme měření antény v rozmezí 100 až 200 MHz z grafu je patrné, že kromě aktivního pásma vyskytující se v intervalu 144 – 146 MHz, rezonuje anténa i na frekvencích 152,7 a 168,9 MHz.



Obrázek 4.9: Graf naměřených hodnot v rozmezí 100 až 200 MHz

### 4.3 Zhodnocení

Pro výpočty a modelování a následnou optimalizaci byl použit program 4NEC2. Výsledky modelování naznačovaly, že anténa nebude tak širokopásmová, jak uváděly některé zdroje. Z grafu na obrázku 3.11 vyplývá, že teoretická šířka pro  $SWR \leq 2$  je zhruba 0,69 MHz. Hodnoty získané z měření vyrobené antény LPY vyšly odlišně. Praktické měření pomocí anténního analyzátoru *MFJ 259 B* ukázalo na hodnotu 2 MHz při  $SWR \leq 2$ .

Měření probíhalo v reálných podmínkách na střeše 11-ti podlažního domu ve dvou metrech nad střešní krytinou. Anténa byla upevněna do držáku za konec ráhna v zadním směru antény. Konstrukce držáku byla navržena tak, aby co nejméně ovlivnila samotné měření. Byl použit pětí metrový prodlužovací koaxiální kabel, aby měření nebylo ovlivněno lidským tělem. Anténa byla nasměrována do volného prostoru s otevřenou krajinou s velmi vzdálenými budovami (přibližný azimut 250°). Výsledky praktického měření navrhnuté antény jsou popsány v tabulce 4.1. Došlo k pokusu měření antény LPY v domácích podmínkách v místnosti, ovšem změřené hodnoty se velmi odlišovaly od měření v reálných podmínkách (na střeše domu). Výsledky tohoto měření naznačují, že uvnitř místnosti se nacházejí vodivé předměty jako armatura a radiátor atd., které výrazně ovlivňují měření směrem k neodpovídajícím výsledkům. Měření v pokoji razantně nadhodnotilo výsledky měření. Při přesouvání a otáčení antény vůči radiátoru se ukazatel  $SWR$  výrazně měnil. Tento pokus jen potvrdil, že různé vodivé předměty v okolí antény mohou její požadované výsledky měnit jak k lepším, tak také k horším hodnotám. Měření antény bylo rovněž uskutečněno na profesionálním školním analyzátoru *R&S® ZND Vector Network Analyzer*. Měření proběhlo ve školní místnosti. Výsledky byly velmi podobné k výsledkům změřeným pomocí anténního analyzátoru *MFJ 259 B*, avšak školní analyzátor ukázal o něco horší výsledky. Rozdíly hodnot by bylo možno vysvětlit tím, že měření neproběhlo v reálných podmínkách, tak jak tomu bylo při měření s anténním analyzátozem *MFJ 259 B*.

Všechna tato zmíněná měření proběhla na upravené anténě, kde nejkratší LPDA dipól byl zvětšen na rozměr 870 mm. Z grafu vytvořeném v programu 4NEC2 (po optimalizaci) bylo možno vyčíst, že nejlepší hodnota  $SWR$  1,4 se nachází na frekvenci zhruba 143,8 MHz. Ve skutečnosti nejlepší hodnota  $SWR$  1,2 byla naměřena při prvním proměřování na frekvenci 148,6 MHz. Je to rozdíl o 4,8 MHz. Toto naznačuje, že dipóly antény LPY byly sestrojeny příliš krátké pro pásmo 144 MHz až 146 (využívané radioamatérskou službou).

Výroba antény pro VKV vyžaduje velkou přesnost a klade velké nároky na výrobu jednotlivých částí antény. Přesto náročné dílenské zpracování v domácích podmínkách přineslo toleranční rozdíly maximálně  $\pm 1$  mm. Při takové nepřesnosti by nemohlo dojít k tak velkému rozdílu. Toleranční nepřesnost přenesená do frekvence by se mohla nacházet v rozmezí maximálně  $\pm 0,25$  MHz. Na propojení LPDA části byl použit jednožilový zemnicí kabel (nepletený) o průměru samotného měděného vodiče 1,7 mm. Vodič je pevnější a přímý a nezpůsobuje nežádoucí kroucení. Provedlo se důkladné propájení všech kontaktů. Po tomto opatření se vyhovující hodnoty  $SWR$  o něco posunuly k vyšším frekvencím. Nabízí se tedy vysvětlení, že program 4NEC2 není zcela ideální pro výpočet logaritmicko-periodických antén, natož antény LPY. Pokud bychom chtěli dospět k naladění antény na pásmo 144 MHz až 146 MHz, museli bychom pro simulace použít jiný program.

Z výroby antény LPY plynou další zkušenosti v oblasti konstrukčního vylepšení. Použití materiálu Dural je nejpřijatelnější volba. Avšak po sestrojení antény LPY se jeví některé její části z hlediska konstrukčního poddimenzovány. Např. doporučený průměr dipólu 6 mm je nedostatečný. Při úvaze extrémního počasí, např. vichřice aj. by bylo vhodné použít silnější materiál, popřípadě uvažovat o využití trubkového profilu o průměru 10 mm. Silnější materiál by zároveň usnadnil konstrukční zpracování, kdy do takového materiálu, za účelem připevnění je nutné provrtat díry. V důsledku provrtání tyčového materiálu dochází k dalšímu oslabení materiálu a rizika ulomení dipólů. Pro účely upnutí LPDA dipólu je obtížné sehnat vhodné plastové úchyty. Volba výroba plastových úchytů z PVC se jevila jako nejschůdnější a zároveň nej dostupnější. Plastové úchyty jsou vyrobeny z dvou na sebe položených částí PVC rozstřížených podélně. Plastové úchyty by jistě vyžadovali stabilnější konstrukci, aby se neohýbaly a nepodléhaly vlivům počasí – nadměrné teplo, ultrafialové záření atd. Konstrukce uchycení LPDA dipólů by vyžadovala profesionálně zhotovené plastové úchyty. V domácích podmínkách tomuto požadavku nebylo možné vyhovět.

## 5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout sedmi prvkovou logaritmicko periodickou Yagi-Uda anténu pro pásmo 144 MHz. V bakalářské práci byla provedena teoretická příprava popsáním antén a jejich parametrů. Dále byly popsány vlastnosti antén Yagi-Uda, LPDA antény. Nakonec byly důkladně popsány vlastnosti a byly přiblíženy výpočty antény LPY. Následně byla simulace, modelování a následná optimalizace v programu 4NEC2. Výsledky simulací naznačovaly zisk antény 9,54 dBi nejlepším SWR 1,7 na frekvenci 145,2 MHz. Po optimalizaci se nejlepší hodnota SWR zlepšila na 1,26 SWR na frekvenci 143,8 MHz. Výsledky simulací také naznačovaly, že anténa nebude tak širokopásmová, jak uváděly některé zdroje. Tento poznatek lze vyčíst z obrázku 3.11 a kde také vidět že šířka pásma je zhruba 0,69 MHz. Při následném měření na střeše nám vyšla nejlepší hodnota SWR 1,0 na frekvenci 145 MHz se šířkou pásma 2 MHz. Nejlepší hodnota měření v učebně byla 1,2 SWR na frekvenci 145,2 MHz, tento mírný výkyv je možné vysvětlit tím, že v učebně nejsou ideální podmínky a měření mohlo být ovlivněno jinými anténami v místnosti, nebo jinými vodivými předměty. Hodnoty z měření vyrobené antény LPY tedy vyšly zcela odlišně než podle simulace v programu 4NEC2. Záměrem bakalářské práce bylo sestrojít anténu s vysokým ziskem na nejkratším možném ráhnu. Jak bylo popsáno v kapitole 2.3, zisk LPY antény v úzkém pásmu činí až 11,36 dBd což je při stejné délce ráhna u Yagi-Uda antény přidání zisku cca o 2 dBd. Toto bylo hlavní motivací tvůrců a konstruktérů tohoto typu antény, jako je např. Ing. Matuszczyk. Deklarovaná širokopásmovost antény z některých zdrojů se nepotvrdila, ale zmíněná šířka pásma 2 MHz je pro naše potřeby dostačující. Vliv Yagi-Uda prvků je dominantní a proto šířka pásma LPY antény kopíruje tu od Yagi-Uda. Pro zlepšení vlastností antény LPY by bylo vhodné osadit anténu reflektorem, např. s jednou tyčí, nebo je možné použít složitější konstrukce reflektoru. Tím by se vylepšil předozadní poměr a zvýšil by se i zisk antény. Anténa LPY je neprávem opomíjena. Kromě využití v radioamatérské službě by zajisté našla uplatnění i v dalších radiokomunikačních službách, především v pozemních nepohyblivých službách, jako je například služba radioastronomická.

## Použitá literatura

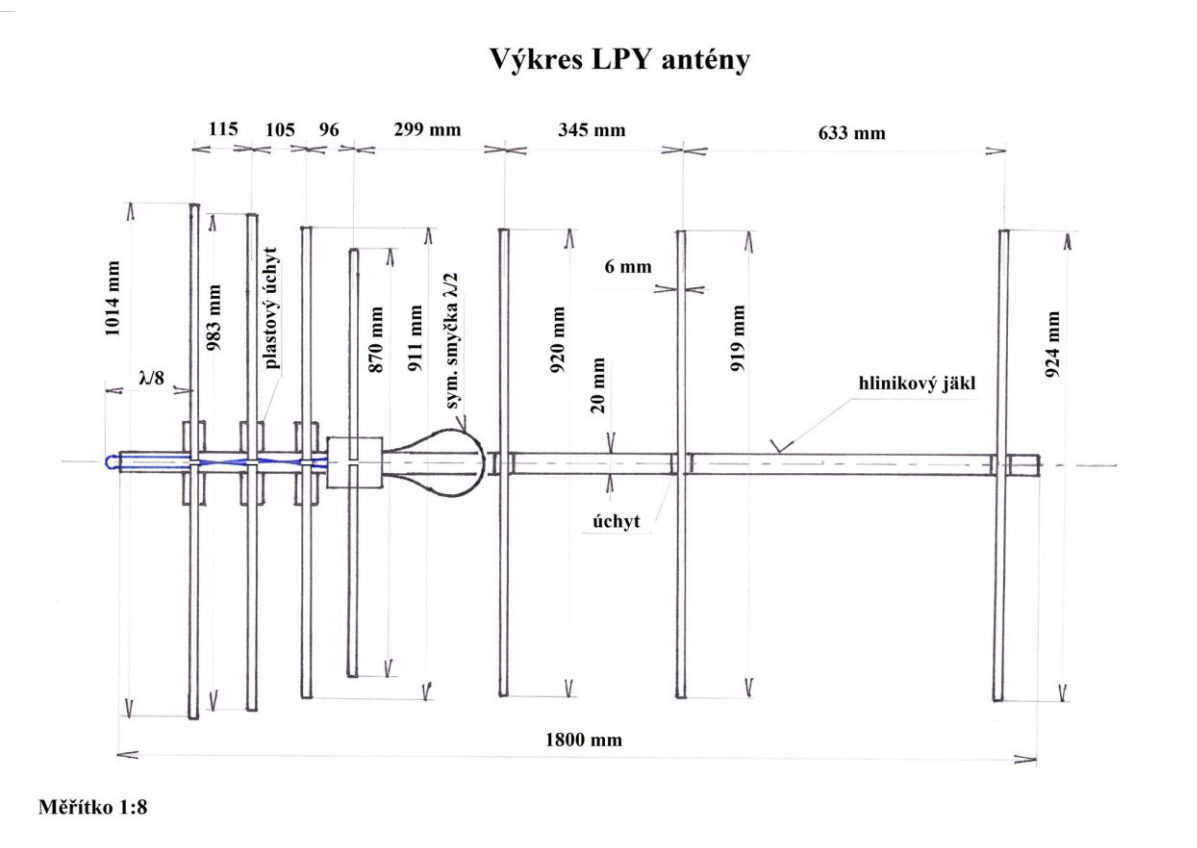
- [1] Mgr. Jacek Matuszczyk, Antény prakticky, nakladatelství BEN (technická literatura), Praha 2005, ISBN 80-7300-178-0
- [2] Mike Gibbings, The VHF Log Periodic Yagi, Časopis RADIO COMMUNICATION July 1994 – The Journal of the Radio Society of Great Britain
- [3] Ing. Miroslav Procházka CSc, ANTÉNY – Encyklopedická příručka, nakladatelství BEN (technická literatura), Praha 2005, ISBN 80-7300-166-7
- [4] prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida a kolektiv, Multimediální učebnice elektromagnetických vln a mikrovlnné techniky., FEI VUT v Brně. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php>
- [5] P.D.Rhodes, J.R.Painter, The Log-Yagi Array, QST 12/1976 (ARRL), str. 18 až 21
- [6] DVORSKÝ, Marek. *Základy bezdrátových komunikací pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3557-0.
- [7] Nožka Marek, PSK. *Mamut* [online]. Dostupné z: [http://mamut.spseol.cz/nozka/psk/072-parametry\\_anten/tisk.html](http://mamut.spseol.cz/nozka/psk/072-parametry_anten/tisk.html)
- [8] NOVÁČEK, Zdeněk. Elektromagnetické vlny, antény a vedení: přednášky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2006. ISBN 80-214-3301-9.
- [9] Jindra Macoun, časopis Praktická elektronika – A Radio 09/2012, Směrovost a zisk antén (a)
- [10] Jindra Macoun, časopis Praktická elektronika – A Radio 10/2012, Směrovost a zisk antén (b)
- [11] Jindra Macoun, YAGIHO SMĚROVÉ ANTÉNY [1961-1962], Dostupné z: [http://www.ok2kkw.com/next/ok1vr\\_yagi1962.htm](http://www.ok2kkw.com/next/ok1vr_yagi1962.htm)
- [12] Jindra Macoun a JUDr. Milan Štěpánek, Časopis Praktická elektronika – A Radio 04/2004, RADIO „HISTORIE“ – tajný příběh antény Yagi
- [13] Dilshan R Jayakody's Web Log: Homebrew 5 element Yagi antenna for 144 MHz. *Dilshan R Jayakody's Web Log* [online]. Dostupné z: <http://jayakody2000lk.blogspot.cz/2014/11/homebrew-5-element-yagi-antenna-for.html>
- [14] Alexander Žatkovič, TYPY ANTÉN, Dostupné z: [http://alzat.spseke.sk/radiote/elmag/anten\\_typy.htm](http://alzat.spseke.sk/radiote/elmag/anten_typy.htm)
- [15] Pavel Slezák, Příjem elektromagnetického vedení, Dostupné z: <http://elmag.sps.sweb.cz/2.htm>
- [16] Jindra Macoun, Anténní soustavy, Dostupné z: [http://www.ok2kkw.com/next/ok1vr\\_1963.htm](http://www.ok2kkw.com/next/ok1vr_1963.htm)

- [17] VE2ZAZ - Combined 144 MHz Low-Pass / 432 MHz Notch Filter. *VE2ZAZ - Amateur Radio Website / Site Web Radioamateur* [online]. Dostupné z: [http://ve2zaz.net/LowPass\\_Notch\\_Filter/144LowPass432Notch.htm](http://ve2zaz.net/LowPass_Notch_Filter/144LowPass432Notch.htm)
- [18] Tomáš Český CSc, ANTÉNY pro příjem televize, rok vydání 1991, Vydalo SNTL Nakladatelství technické literatury, n. p., ISBN 80-03-00615-5
- [19] SWAN - KOUZELNÁ ANTÉNA? [1978], Dostupné z: <http://www.ok2kkw.com/next/swan1978.htm>
- [20] 6 Element Log Periodic Yagi for 6 meters - Ham Radio Library. *IW5EDI Simone - Ham-Radio - Amateur Radio news from Italy* [online]. Dostupné z: <http://www.iw5edi.com/ham-radio/?6-element-log-periodic-yagi-for-6-meters,70>
- [21] ARRL antennabook CD. Version 1.0. Newington, CT: AmericanRadioRelayLeague, 1998. ISBN 0872597229.
- [22] BALANIS, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley, c2005. ISBN 0-471-66782-x.
- [23] Log Periodic Dipole Array. *ARCTICPEAK* [online]. Dostupné z: <http://www.arcticpeak.com/antennapages/LPDA.htm>

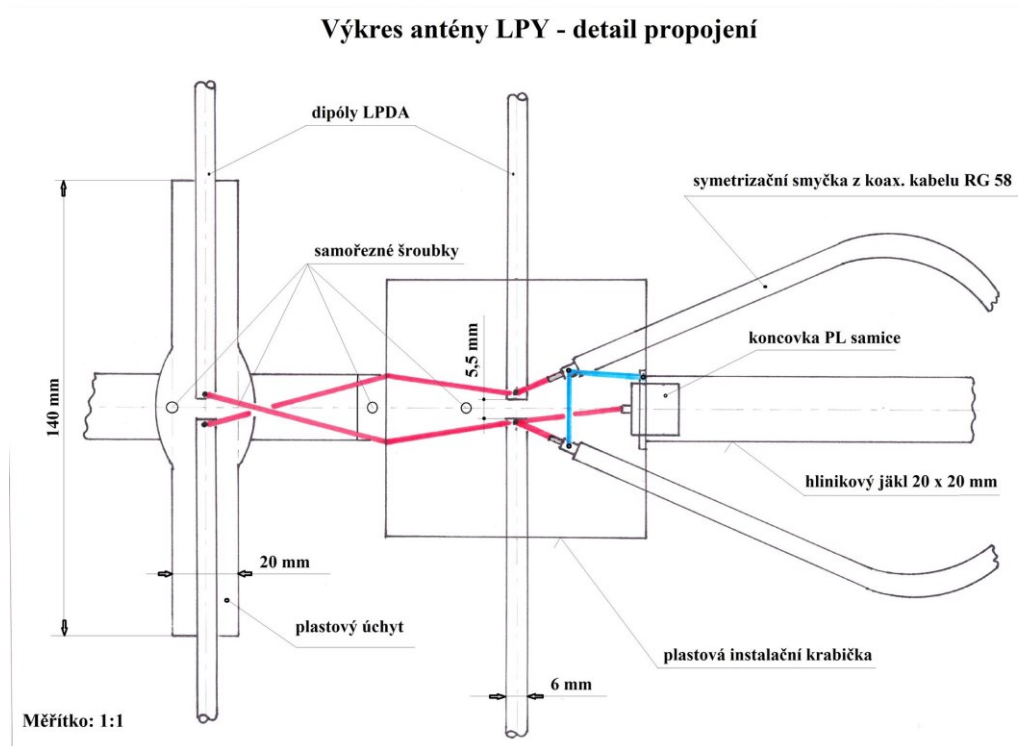


## Přílohy

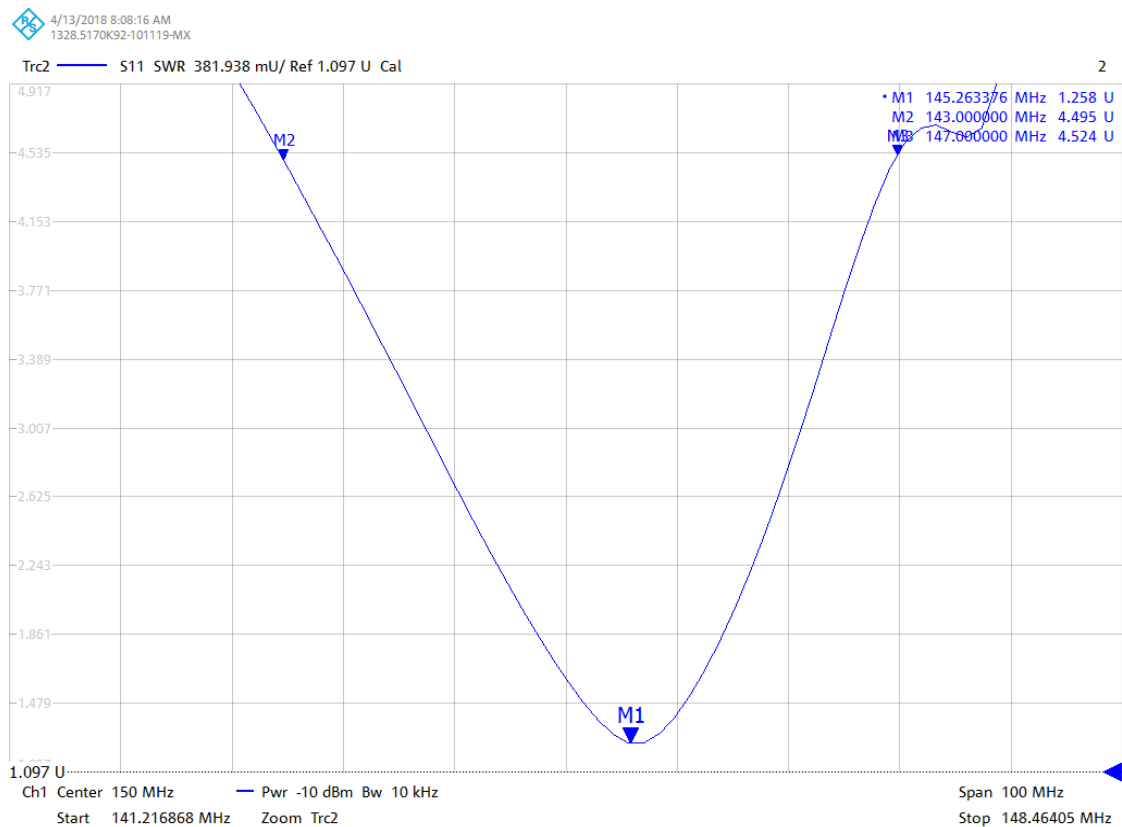
Příloha A: *Výkres LPY antény*



Příloha B: Detail instalační krabičky

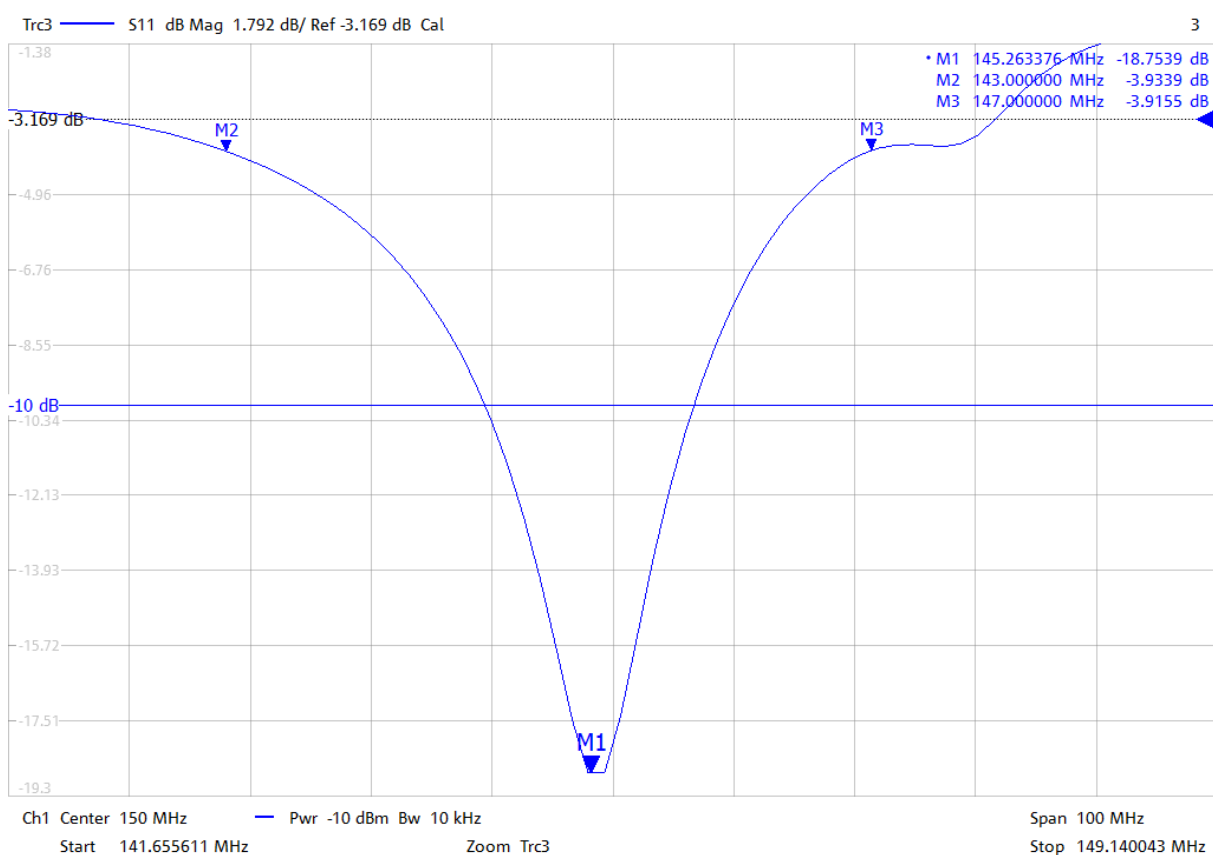


Příloha C: Měření SWR na R&S® ZND v rozmezí 141 – 148 MHz

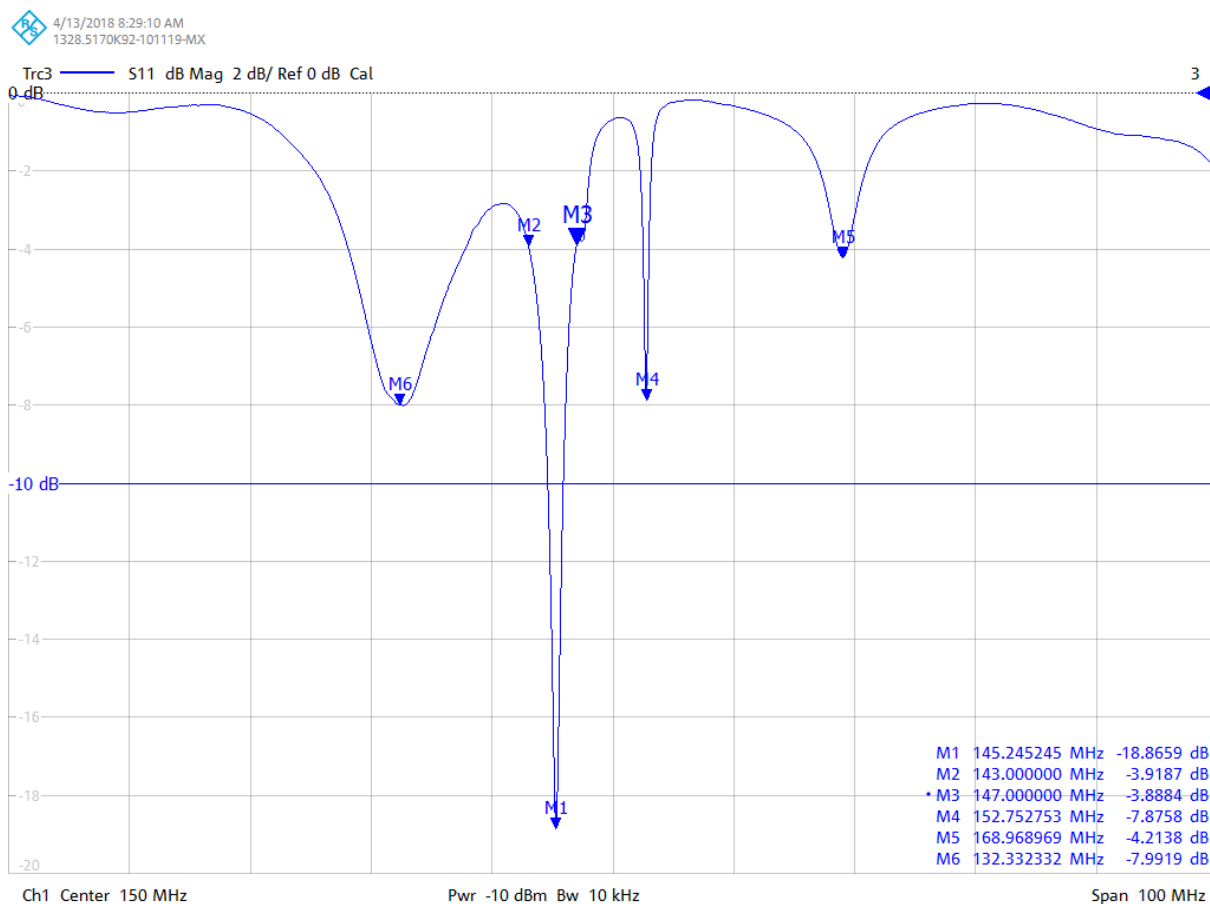


Příloha D: Měření činitele odrazu v pásmu 144 MHz na R&S® ZND

4/13/2018 8:09:04 AM  
1328.5170K92-101119-MX



Příloha E: Měření činitele odrazu rozmezí 100-200 MHz na R&S® ZND

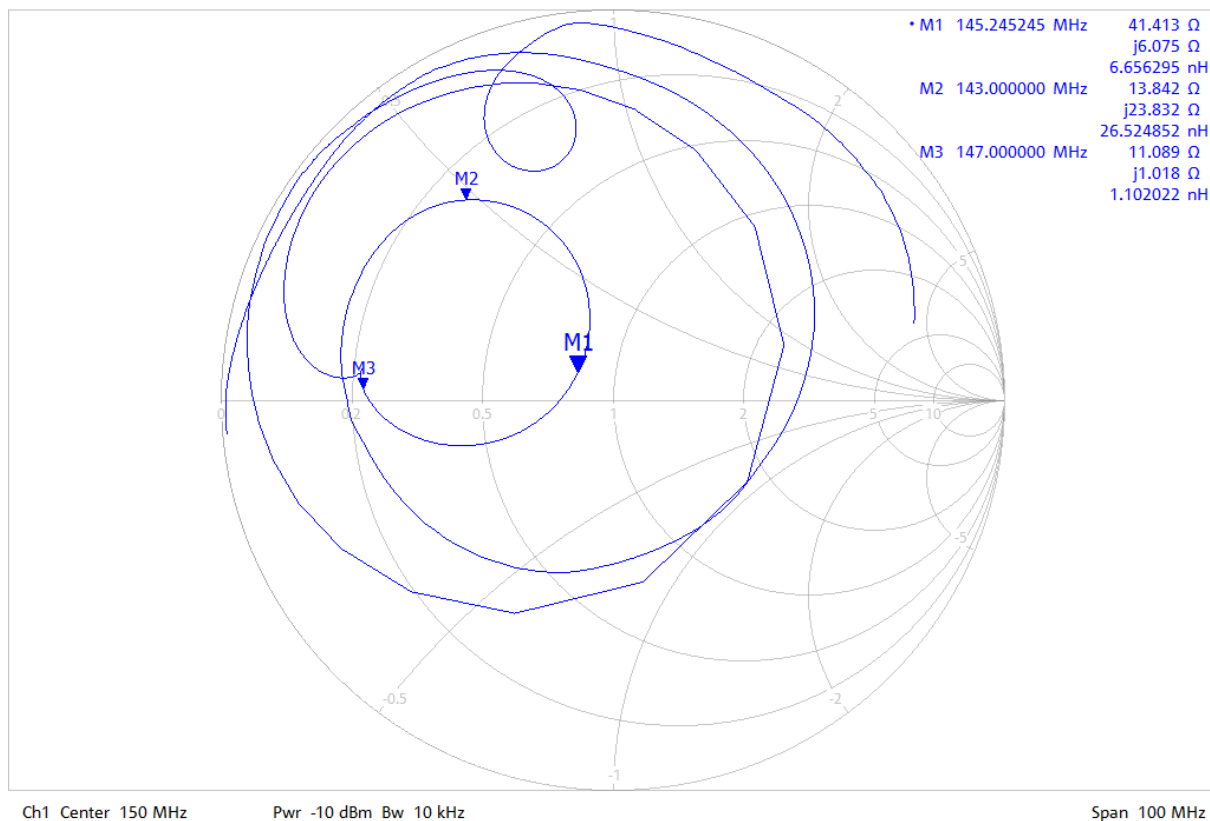


Příloha F: *Smithuv diagram pro LPY anténu měřený na R&S® ZND*

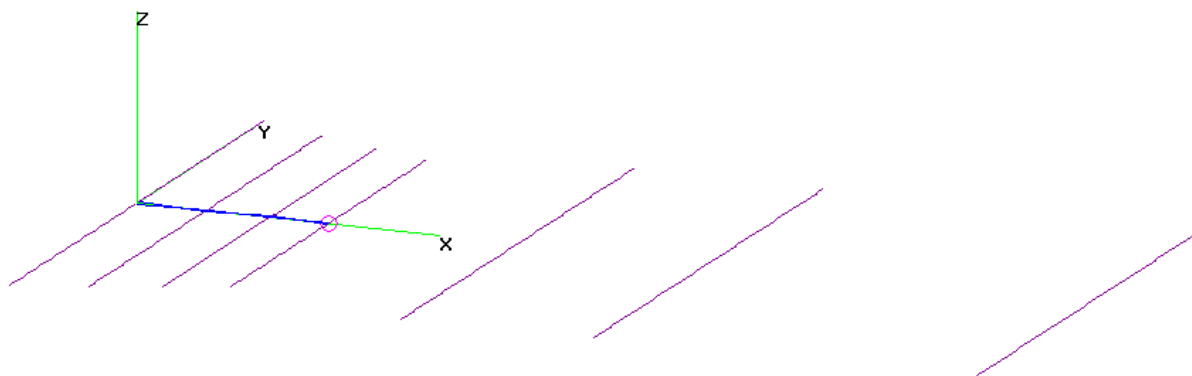
4/13/2018 8:10:59 AM  
1328.5170K92-101119-MX

Trc1 — S11 Smith 200 mU/ Ref 1 U Cal

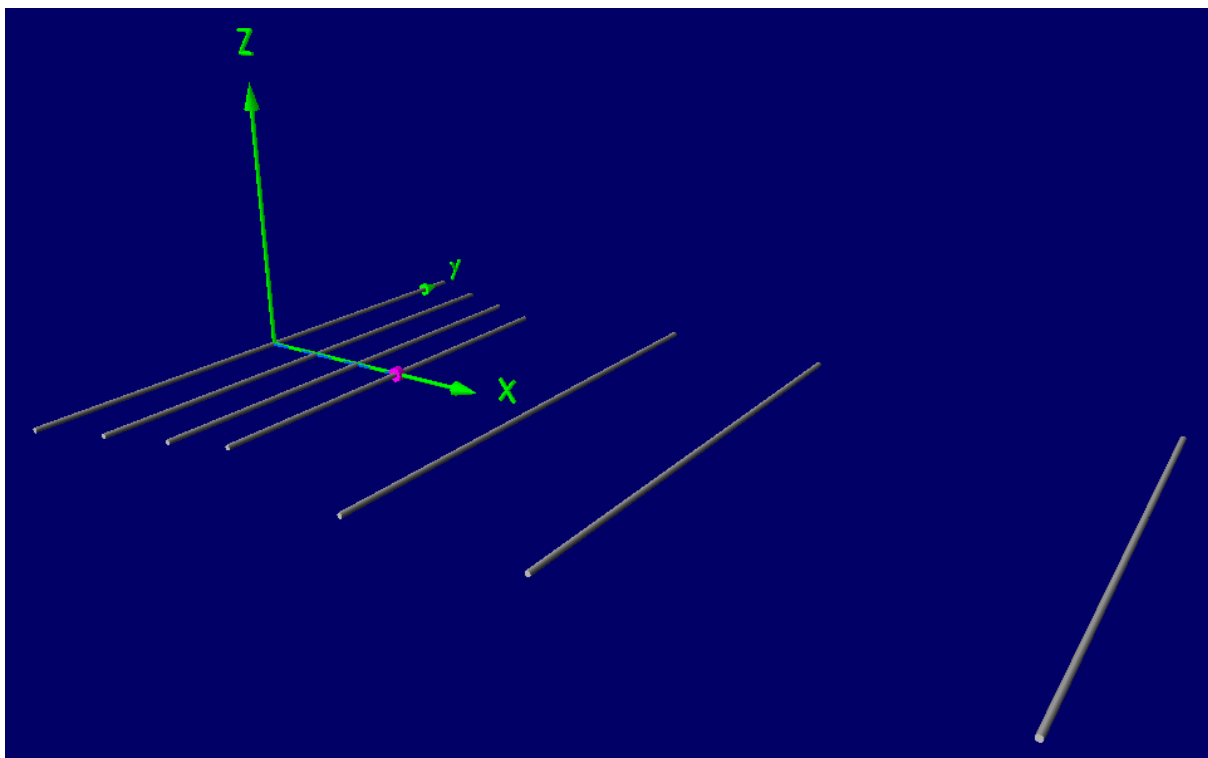
1



Příloha G: *Ukázka antény ve 3D zobrazení*



Příloha H: *Zobrazení geometrie ve 3D*



Příloha I: *Příprava materiálů*





Příloha J: *Pl konektory a držáky*

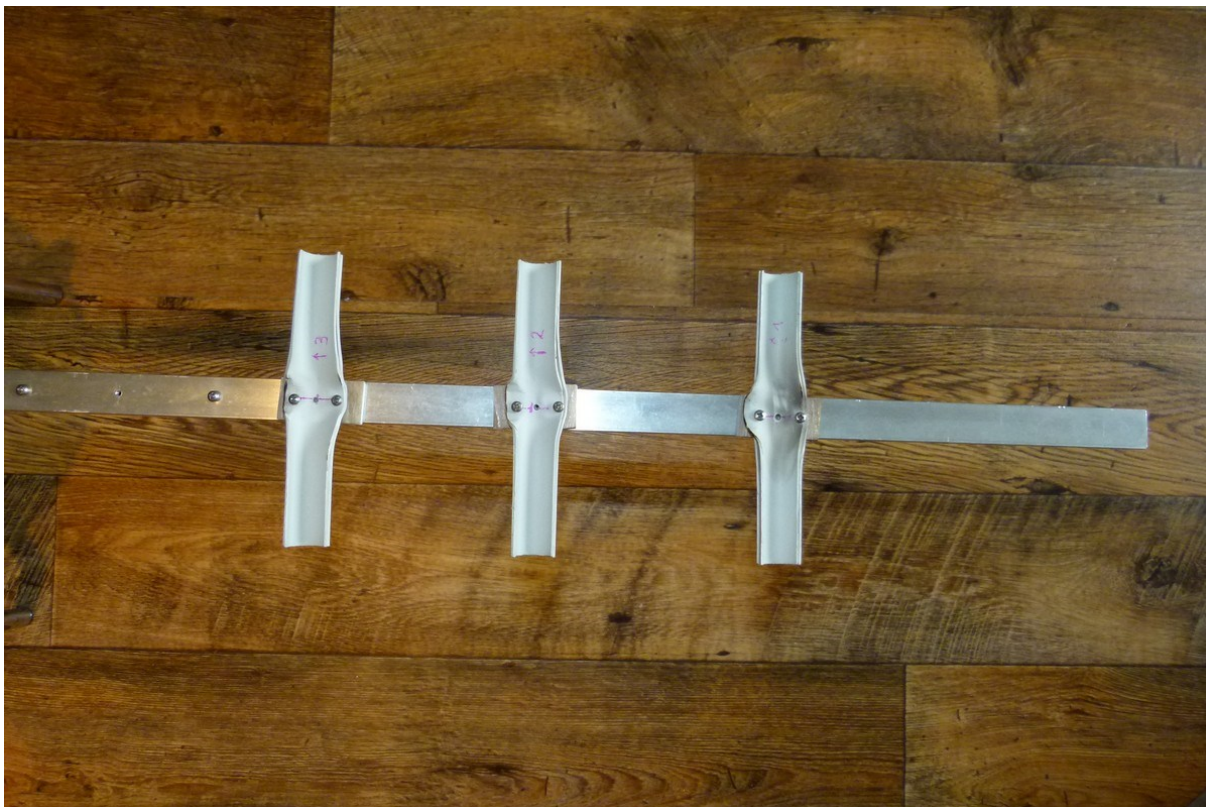


Příloha K: *Detail Yagi-Uda prvku*

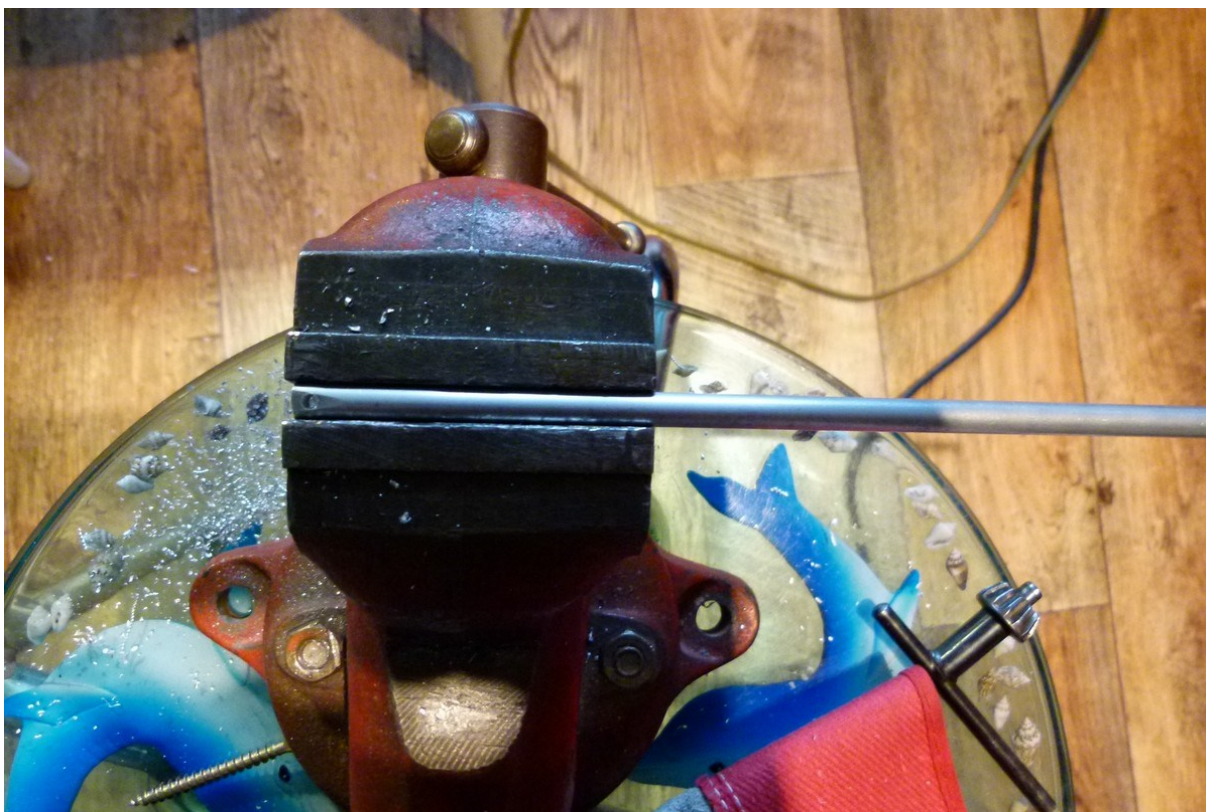




Příloha L: *PVC držáky LPDA prvků*

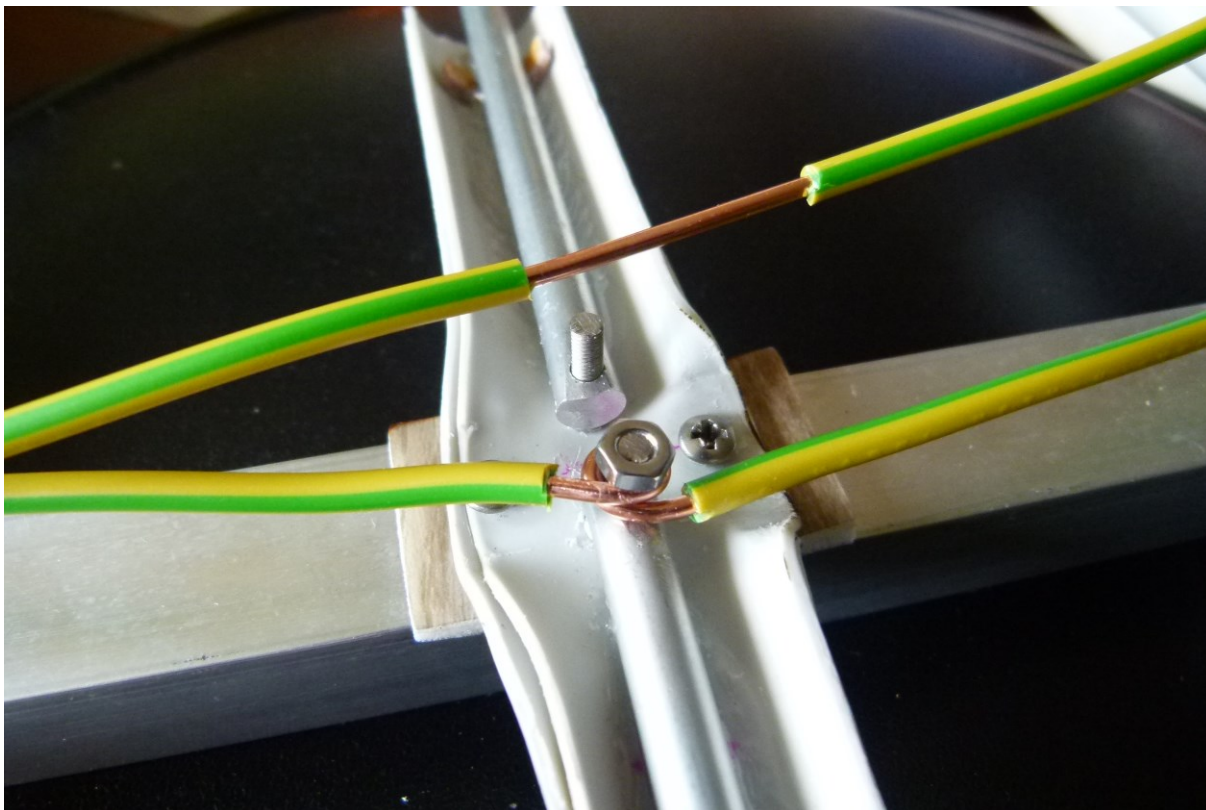


Příloha M: *Vrtání LPDA prvků*

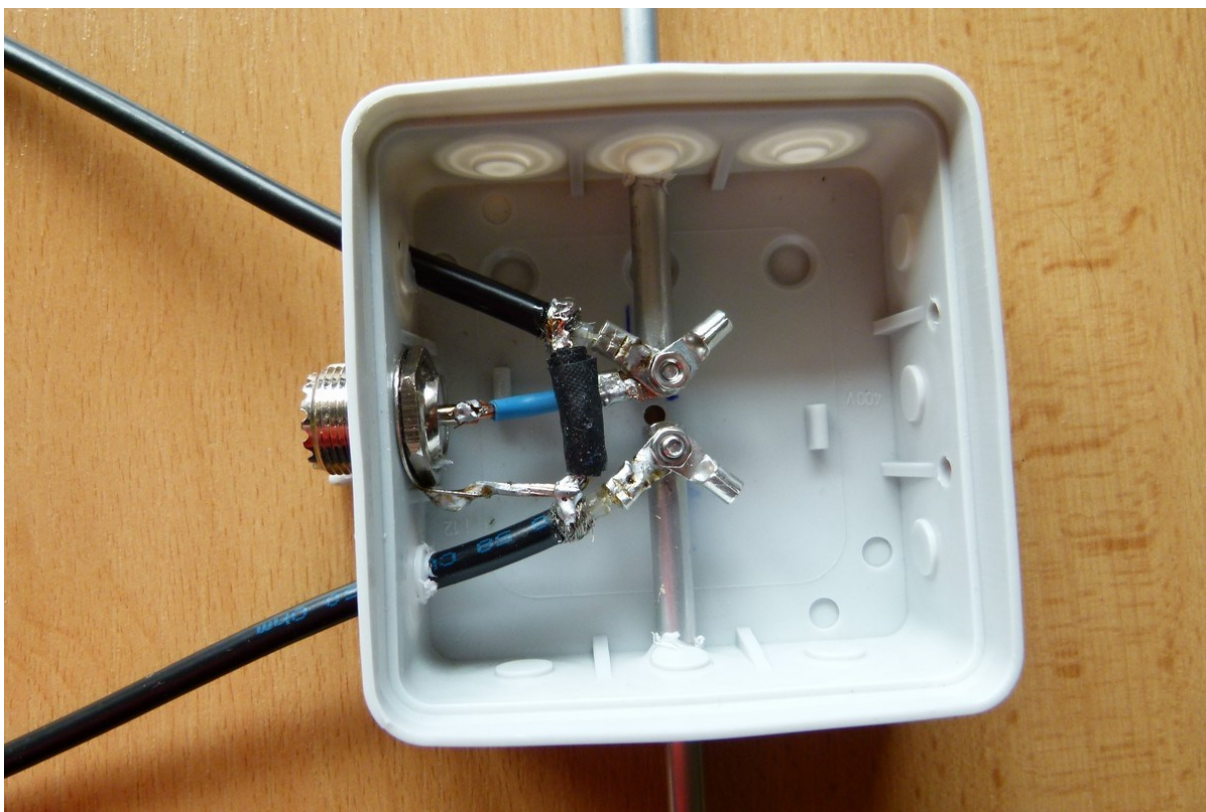




Příloha N:      *Montáž propojovacího kabelu na LPDA prvky*



Příloha O:      *Instalační krabička*

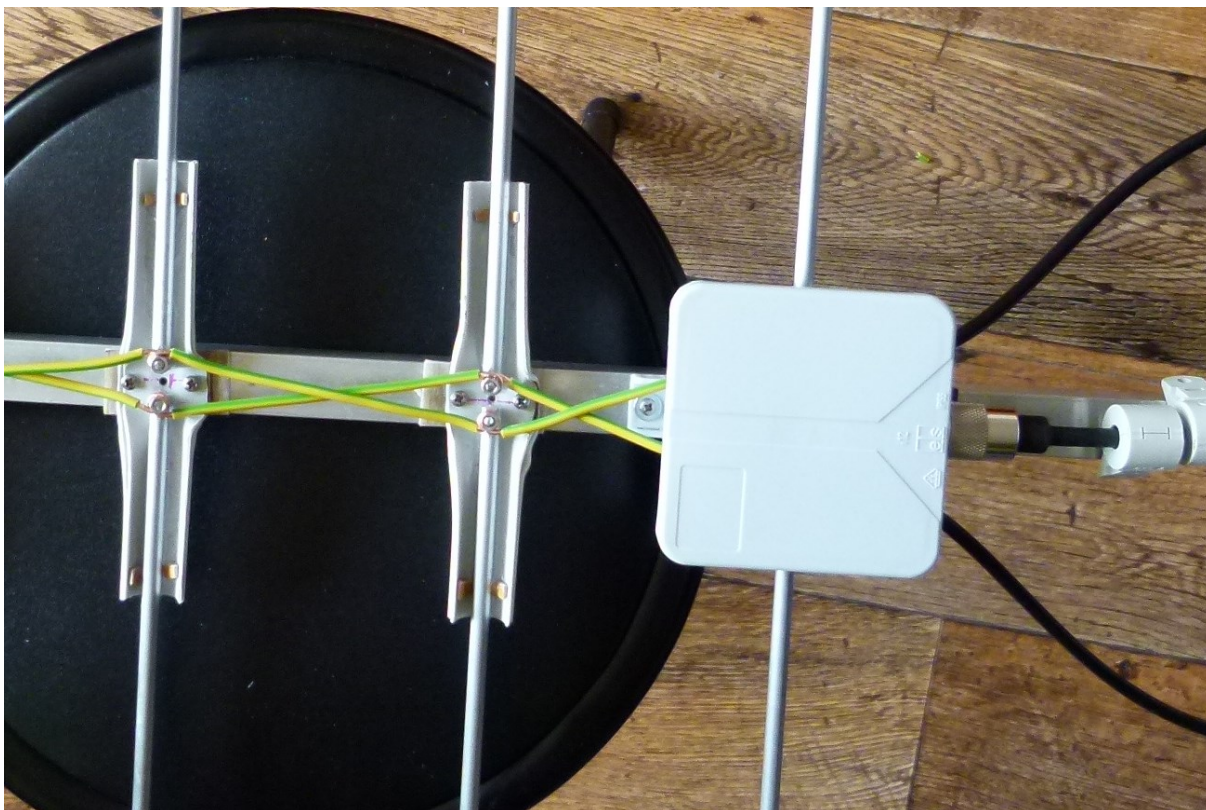




Příloha P: *Finální verze instalační krabičky*



Příloha Q: *LPDA prvky s instalační krabičkou a přizpůsobovací smyčkou*



Příloha R: *Hotová anténa připevněná na střeše*



Příloha S: *CD - Excel/lpy\_vypocet*